



**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR**

DIGESTION ANAEROBIA EN COMUNIDADES RURALES

**PROYECTO FIN DE CARRERA
AREA DE INGENIERÍA TÉRMICA Y DE FLUIDOS**

**Autora: NADIA DE LA TORRE CARITAS
Tutores: ULPIANO RUIZ-RIVAS HERNANDO**

OCTUBRE 2008





Índice

1.Introducción.....	4
2.Objetivos	6
3.Generalidades.....	7
3.1.Necesidades del entorno Rural.....	7
3.2.Desarrollo sostenible	8
3.3.Impacto sociológico	9
3.4. La Biomasa	12
3.4.1.Biomasa vegetal.....	12
3.4.2.Biomasa animal.....	16
3.5.El biogás	19
3.6.Lodos o fertilizantes	25
4.Digestión Anaerobia	28
4.1.Partes que conforman el proceso de digestión	29
4.1.1.Cámara de carga	29
4.1.2.Digestor o cámara de digestión.....	30
4.1.3.Almacenamiento del biogás	32
4.1.4.Gasómetros.....	32
4.1.5.Cámara de descarga.....	33
4.2.Proceso microbiológico y bioquímico de la digestión anaerobia	33
4.2.1.Hidrólisis.....	34
4.2.2.Acidogénesis o etapa fermentativa	37
4.2.3.Acetogénesis.....	38
4.2.4.Metanogénesis	39
4.3.Parámetros importantes que afectan la digestión	42
4.3.1.Valor de acidez (pH).....	42
4.3.2.Temperatura de funcionamiento	45
4.3.3.Contenido de sólidos.....	49
4.3.4.Nutrientes	52
4.3.5.Sustancias tóxicas	55
4.3.6.Tiempo de retención hidráulica	59



5.Tecnologías existentes	62
5.1.Tipos de digestores según la frecuencia de carga de alimentación	62
5.1.1.Digestores tipo Batch/Lote	62
5.1.2.Digestores de tipo continuo	64
5.1.3.Digestores de tipo semicontinuo	65
5.2.Tipo de digestores de acuerdo a su funcionamiento	66
5.2.1.Digestor tipo hindú o de domo flotante	66
5.2.2.Digestor tipo Chino o de cúpula fija	70
5.2.3.Digestor tipo bolsa completa	73
5.2.3.1.Partes del digestor tipo bolsa completa	77
5.2.3.1.1.Tubo de entrada (A)	77
5.2.3.1.2.Tubo de salida (B)	78
5.2.3.1.3.Bolsa de digestión o fermentador (C)	78
5.2.3.1.4.Bolsa de almacenamiento (D)	78
5.2.3.1.5.Tubo de transporte de metano (E)	78
5.2.3.1.6.Recipiente de entrada para la carga (F)	79
5.2.3.1.7.Recipiente de recolección de lodos (G)	79
5.2.3.1.8.Válvula o dispositivo de seguridad (H)	79
5.2.3.1.9.Tubo de limpieza	80
5.2.3.2.Instalación del digestor de bolsa	80
5.2.3.2.1.Ubicación del digestor	80
5.2.3.2.2.Preparando el lugar	81
5.2.3.2.3.Preparando el digestor	82
5.2.3.2.4.Instalando la tubería de entrada y de salida	83
5.2.3.3.Mantenimiento del digestor y preguntas frecuentes	87
5.2.3.4.Digestor de media bolsa	89
6.Modelización y diseño de un digestor anaerobio	92
6.1.Programas actuales	92
6.1.1.AgSTAR - FarmWare	92
6.1.2.Biogas!	99
6.2.Aplicación propuesta	102



7.Conclusiones y recomendaciones	130
8.Bibliografía.....	133
9.Anexos	136
9.1.Confección de la válvula de seguridad	136
9.2.Manufactura del sello del tubo de transporte de biogas.....	139

1.Introducción

El presente trabajo esta elaborado con el fin de orientar a las comunidades rurales hacia la utilización del biogás mediante el uso de digestores (también denominados biodigestores) anaerobios para producir una fuente de energía, y así poder satisfacer diferentes aspectos básicos de la vida, sírvase como ejemplos: en el plano doméstico la cocción de alimentos, la iluminación cuando no haya luz solar o para el uso de pequeños motores que pueda ayudar a otras tareas de la comunidad.

Para la utilización de este proceso es imprescindible que se tenga pleno conocimiento de las características de la biomasa a utilizar, como por ejemplo los contenidos de sólidos totales, o sólidos volátiles, etc.; y para ello es necesario que se cuente con ayuda especializada. Hoy en día, debido a la concientización que se da a los alumnos en las universidades, a los futuros ingenieros; se esta dando ayuda a las comunidades rurales en diferentes ámbitos, véase el caso de Nicaragua, donde la Universidad Carlos III conjuntamente con universidades locales establecieron, con éxito, un proceso de alfabetización de la comunidad. El siguiente paso es de ayudarles a utilizar diferentes medios para poder obtener energía, en este caso es la utilización de la biomasa proveniente de animales para la obtención de biogas, y la ayuda radica en la difusión del conocimiento sobre este sistema, de manera que ellos sean capaces de mantener el sistema de forma independiente.

Los casos de las comunidades rurales son semejantes, no importando su ubicación geográfica; las necesidades son las mismas, así como las restricciones o limitaciones; es por ello que se deben pensar en medidas que esté al alcance de sus posibilidades, sin escapar de la realidad o mejor dicho, tomándola en cuenta.



Mi trabajo en este desarrollo consiste en la investigación del proceso de digestión anaerobia, los principales factores que lo afectan, la tipología existente, etc.; y como consecuencia de dicha investigación he llegado a la conclusión que el tipo de digestor que se presta más a las características de las comunidades es el de tipo bolsa. Y para que los usuarios de este sistema puedan tener una primera aproximación de los requerimientos del proceso, he formulado una pequeña aplicación utilizando el lenguaje de programación Mathcad; así, a partir de las necesidades de consumo, se pueda tener una idea del espacio que requiere un digestor tipo bolsa y la cantidad de animales que se debería tener para que se pueda producir biogás.

2.Objetivos

El objetivo del presente trabajo es de analizar el proceso de digestión anaerobia como mecanismo para la producción de energía mediante el biogás (que tiene un apreciable contenido de metano, elemento necesario para que se utilice como combustible), y en consecuencia la sustitución del diesel, gasolina y leña por biogás como por ejemplo en la cocción de alimentos o para generar electricidad mediante el empleo de motores.

Las consecuencias que implica el uso de la biomasa como input del proceso de digestión anaerobia nos ayuda a conseguir los siguientes objetivos de carácter sanitario, como puede ser la eliminación de la acumulación de estiércol animal y de otros materiales biodegradables. Y las consecuencias que implica el biogás como output son de carácter social, como puede ser, el evitar la dependencia de las comunidades rurales con combustibles provenientes del petróleo que además de contaminantes son caros, y una de las limitaciones de las comunidades rurales es precisamente el dinero. Además, muchas de las comunidades utilizan leña para la cocina, la tarea de recoger este material es, la mayoría de las veces, de las mujeres o de los niños.

Pero, ¿cuán sostenible puede ser un sistema si no se analiza cuantitativamente las cantidades de entrada de materia que se requiere para la producción de algún determinado producto, que en este caso es del biogás? Es por eso que como medida de ayuda a las comunidades rurales, he procedido a crear un pequeño programa, con el Mathcad como herramienta, que da como resultado la cantidad de material que necesito para el proceso, cantidad de animales, el tiempo de fermentación que se requiere así como el diseño de los digestores de tipo bolsa, es decir el dimensionamiento del mismo.

3.Generalidades

3.1.Necesidades del entorno Rural

Las comunidades rurales necesitan cada vez depender menos de determinados elementos que les sea difícil conseguir debido a las limitaciones económicas por las que atraviesan. Es el caso de la dependencia de combustibles fósiles para su utilización en la cocción de alimentos, calefacción y generación de electricidad; en estos tiempos donde el precio de los combustibles depende del precio del petróleo, y que a su vez en estos momentos ha alcanzado valores records jamás imaginados.

Una manera de poder ayudar a estas comunidades es la de enseñarles implementar un sistema que permita obtener combustible mediante técnicas probadas y seguras que funcionen con la provisión de recursos con los que cuentan actualmente, y que las comunidades sean capaces de mantener dichos sistemas, una vez implantados, para poder asegurar su independencia de elementos derivados del petróleo. Y en el mejor de los escenarios poder sacar provecho económico del biogás como combustible para la generación de electricidad, si es que la producción es capaz de satisfacer primero las necesidades de la comunidad y luego, si se da el caso, que haya un sobrante de biogás.

Sin embargo para poder sacar provecho del biogás y convertirlo en una unidad de comercio es necesario que el proceso de generación sea viable físicamente (contar con los elementos necesarios para su producción) y económicamente. En el caso de la generación de Biogás para su futura venta mediante el proceso de digestión anaerobia, es necesario que se cuente con una cantidad considerable de animales, que a veces es difícil de alcanzar en una comunidad rural cuando no trabajan en cooperativas.

3.2.Desarrollo sostenible

Existen muchas ventajas en la utilización del biogás como sistema en las comunidades rurales. El proceso en términos generales, funciona por la digestión anaerobia de los desechos animales y humanos.

En Biogás no sólo es conveniente por su uso como sustituto de combustible como puede ser el kerosene o la leña; sino que su utilización supone un mínimo o nulo impacto al ambiente, y como razón principal es que para la producción del biogás se utilizan recursos que las comunidades ya cuentan, debido a que la mayoría tienen animales que son utilizados como proveedores de alimentos como es el caso de las vacas para la generación de productos lácteos, cerdos como futuros alimentos, pollos como proveedores de huevos y para la carne, la cobaya como carne, etc.

Como punto adicional, la producción del biogás trae como consecuencia la producción intrínseca de fertilizantes ricos en proteínas y suficientes nutrientes que necesita la tierra en la agricultura.

El sistema crearía un ciclo que las comunidades podrían mantener teniendo los cuidados pertinentes. La utilización de los desechos animales y/o humanos para la producción del biogás y de fertilizantes para los campos de cultivo conlleva a la no dependencia de los combustibles caros que pueden mejorar la calidad de vida de las personas que viven en las comunidades, no se estaría dañando el medio ambiente, mejoraría las condiciones en el plano agrícola que se verá realimentado con la alimentación de la comunidad y de los animales.

3.3. Impacto sociológico

Después de analizar los diferentes sistemas que se nos ofrece para la producción del biogás mediante el proceso de la digestión anaerobia, que se desarrollará posteriormente; podemos decir que la tecnología que se adecua a las comunidades rurales es la de los digestores tipo bolsa que son de bajo coste, puesto que son de gran utilidad en las áreas rurales donde las familias poseen ganado, inclusive en pequeñas cantidades.

Podemos considerar como problemas más comunes en las comunidades rurales en relación a la temática social:

- Las personas que viven en comunidades rurales, como se dijo anteriormente, están sujetas al precio del suministro de los combustibles convencionales y de los fertilizantes, por lo tanto a sus respectivas fluctuaciones o variaciones de los precios.
- Sustitución de la leña por el metano como combustible para la cocina, evitando así el desprendimiento de humo, que es dañino para las vías respiratorias.
- No se requiere buscar leña diariamente para cocinar, tarea normalmente asignada a las mujeres y niños.
- La carga de estiércol al digestor elimina moscas y malos olores, además de reducir enfermedades del ganado como la Mastitis (inflamación de las ubres de las vacas).

Otro factor muy importante que hay que tener en cuenta es la problemática que trae consigo la instalación e implantación de un nuevo sistema en una comunidad que no ha experimentado actividad similar con anterioridad, así mismo, si requiere de esfuerzo físico y moral de parte de los comuneros además de su habitualidad en el mantenimiento de los digestores.

La estrategia para la divulgación y disseminación de esta tecnología que se ha visto más acertada es a través de digestores demostrativos. Esto es, instalar uno o dos digestores por comunidad, en una granja municipal si hay interés de las autoridades o en granjas o centros educativos ‘modelo’ que existan, de forma que los vecinos vean su funcionamiento, manejo y beneficios. Esta estrategia no es agresiva y se da a conocer una tecnología nueva, de modo que las familias tendrán información y criterios propios para decidir la conveniencia de introducir, o no, un digestor en sus viviendas y manejo agropecuario. En posteriores visitas a las comunidades se puede hacer ya una propagación mayor a las familias interesadas. La experiencia indica que es mejor introducir los digestores demostrativos en dos familias a la vez, de esta manera, se genera apoyo entre las familias, se pueden resolver problemas cotidianos con la transmisión de conocimientos y se puede aprender de manera interactiva.

Resalto la importancia del apoyo tanto físico como moral entre familias, debido a que se ha comprobado que muchas veces los digestores en un principio no genera el biogás que se requiere, ocasionando frustración en los usuarios, y por lo tanto muchas veces quieren dejar de lado el plan o el proyecto.

Las razones más importantes por las cuales se dejaron de implantar durante un lapso de tiempo esta tecnología, aún sabiendo que sería beneficiosa para los campesinos, fueron:

- Fallas en el diseño de determinados tipos de digestores como ejemplo podemos nombrar al tipo Chino.
- Fallas constructivas por lo tanto económicas, como consecuencia del primer punto.
- Dificultades para el financiamiento, puesto que se requería gente cualificada que contase con determinados conocimientos y habilidades para el diseño y la construcción de dichos digestores.

- Problemas operacionales debido a una carga incorrecta del digestor o un mantenimiento deficiente. Normalmente la introducción de la tecnología era impartida por dicha gente cualificada, el mantenimiento era enseñado a los pobladores de las comunidades, pero si no se continuaba con lo instruido podría incidirse en fallos como éstos. Además también había problemas de organización surgidos de diferencias de objetivos y ausencia de coordinación.
- Dejando de lado el problema de la viabilidad económica o los altos costes de fabricación de los digestores, hubo cierta deficiencia en la construcción de los mismos, debido a la baja calidad de los materiales utilizados para hacerlos, lo que provocaba fugas del material dentro del reactor a través de las paredes; y esto se debía a la poca cualificación del personal entrenado para construir dichos reactores (Kristoferson y Bokhalders, 1991).

En consecuencia de los problemas descritos anteriormente, Marchaim (1992) ha incidido en la importancia de combinar la implantación de la tecnología con las condiciones sociales, culturales y ambientales del lugar donde se va a implantar y construir los digestores, por lo que es imprescindible la evaluación del escenario de estos digestores.

Por otro lado, en los países industrializados, los programas de divulgación son diferentes para el uso de los digestores, y se han construido digestores más grandes y con un control más elaborado. Utilizando así, los lodos provenientes de las aguas residuales, los desechos municipales sólidos o las aguas orgánicas residuales originados en los procesamientos alimenticios, lecherías, cerveceras, farmacéuticas, pulpa y papel o la producción del alcohol.

En el caso de Alemania, se han implementado las plantas pilotos con un sistema vitivinícola sostenible, con el fin de satisfacer la demanda de electricidad, usando como componentes de entrada las aguas residuales y

los deshechos orgánicos para obtener energía a través de la conversión anaeróbica.

En otros países como es el caso de Suecia, para la producción del biogás, se emplean los subproductos derivados del cultivo que tienen bajo contenido de lignina, como por ejemplo el trigo y la alfalfa.

Debido a los resultados positivos de muchos países que utilizaron los rellenos sanitarios para la producción del biogás, otros países como Austria, Francia, Finlandia, Reino unido y E.E.U.U ya operan con este tipo de plantas generadoras de energía.

3.4. La Biomasa

3.4.1. Biomasa vegetal

Biomasa vegetal es un término que abarca todos los materiales orgánicos provenientes de las plantas (incluyendo las algas, árboles y los productos de las cosechas).

Debemos citar a la fotosíntesis como origen de la biomasa vegetal, puesto que la formación de materia viva o biomasa se lleva a cabo a partir de la luz solar, mediante el proceso de fotosíntesis, por el que se producen grandes moléculas de alto contenido energético que están almacenadas en los enlaces químicos.

La energía química se obtiene a través de la ruptura o destrucción de los enlaces de las moléculas de carbono que contienen las plantas; esta ruptura de enlaces es ocasionada dentro de la digestión, combustión o descomposición de la materia vegetal.

El efecto de la fotosíntesis lo podemos describir de la siguiente manera, es el proceso por el cual la clorofila contenida en los organismos como son las plantas, algas, y otras bacterias, capturan energía en forma de luz y las convierte luego en energía química. Se

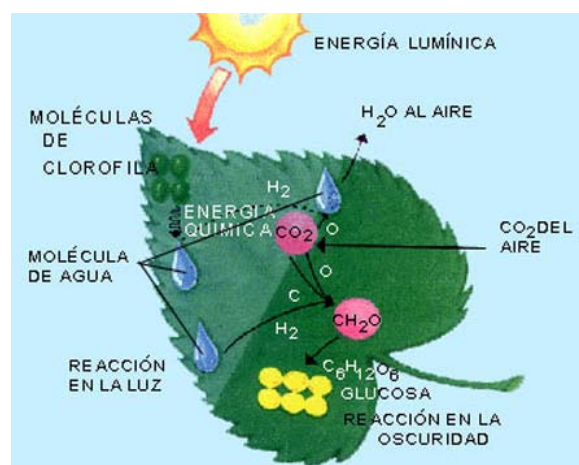
puede decir que toda energía disponible en la biósfera de la tierra o zonas donde exista vida, está hecha a disposición de la fotosíntesis. Una fórmula generalizada de la fotosíntesis es:



La fórmula H_2A representa a un compuesto que puede ser oxidizado. Puede ser por ejemplo la molécula del agua H_2O y A_2 sería el oxígeno liberado.

La fotosíntesis consiste en dos series presentadas en la figura 1: series de reacciones dependientes de luz pero independientes de la temperatura denominadas **reacciones luminosas**, y series de reacciones dependientes de temperatura pero independientes de luz denominadas **reacciones oscuras**. La tasa de la primera serie puede incrementarse a medida que aumenta la intensidad de luz (del cual tiene limitaciones) mas no la temperatura; mientras que la tasa de la segunda serie puede incrementarse a medida que se aumenta la temperatura mas no la intensidad de la luz.

Figura1: el gráfico muestra los procesos básicos en la fotosíntesis



Fuente: R. Caudillo. www.especial.org

Si tenemos en cuenta las ecuaciones referidas a la fotosíntesis, podemos entonces calcular la eficacia máxima teórica de la fotosíntesis:

Rendimiento teórico aproximado :	30%
Radiación solar llega a tierra :	40%
Absorción de las hojas :	70%

$$\text{Eficacia máxima teórica} = (0,3 \cdot 0,4 \cdot 0,7) \cdot 100\% \approx \mathbf{8\%}$$

Sin embargo, en todas las plantas se producen pérdidas de energía debidas a la respiración del vegetal, y están estimadas en cerca del 40%. Por otro lado, la realidad es que los valores más altos hechos en condiciones óptimas de campo son del orden del 3%. Pero a menudo estas cifras corresponden a periodos cortos de crecimiento y cuando se derivan los valores medios para el año completo, se encuentran los valores entre el 0,5% y el 2,5%, siendo el orden del 1% la media para el caso de cosechas anuales.

$$\text{Eficacia máxima teórica} \approx \mathbf{1\%}$$

Podemos observar que la eficacia máxima teórica es mínima, pero ha de considerarse que los sistemas vivos que captan y convierten la energía solar, se encuentran ampliamente distribuidos sobre tierra y aguas del planeta, cubriendo una enorme superficie y representando así a un tipo de colector solar.

Sin embargo, existen limitaciones en este tipo de fuente energética, como lo es la difícil recolección; además como gran parte se encuentra dispersa, implica que se disparen los costes energéticos de recolección y transporte, así como se restrinja el posible aprovechamiento de la biomasa producida en lugares alejados de los centros de utilización. En la tabla 1 se muestra una tabla comparativa de la energía vegetal.

Tabla 1: Comparativa de la energía vegetal dispersa.

Tipo de Biomasa Vegetal	Superficie ocupada (10^6 km^2)	Producción Total (10^9 Tm/año)	Equivalente energético (10^{20} J)
Biomasa Acuática	365	70	10
Bosques	57	85	15
Prados y estepas	24	25	3
Desiertos y tundras	50	5	0,5
Cultivos agrícolas	14	15	1,5
TOTAL	510	200	30

Fuente: La energía de la biomasa. Francisco Jarabo Friedrich

Cabe resaltar que el proceso es cíclico, ya que al oxidarse el carbón de las plantas en el proceso de digestión, se produce CO_2 y agua que serán a su vez disponibles en el ambiente para producir de nuevo biomasa.

El valor de un determinado tipo de biomasa depende de sus propiedades químicas, físicas y de las moléculas del que están hechas. Desde hace millones de años, el hombre ha utilizado la energía de las plantas, ya sea para quemarlas y utilizarlas para cocinar o para alimentarse de ellas debido a su contenido rico en azúcares y almidón. En nuestros días, la biomasa fosilizada es explotada como carbón o gasolina (fuel). Sin embargo lleva millones de años el convertir las plantas en biomasa fosilizada y el quemar este tipo de biomasa produce altas emisiones de CO_2 que conlleva al efecto invernadero.

Un factor importante que se tiene en cuenta a la hora de considerar el uso de la biomasa vegetal para aliviar al calentamiento global es el periodo de tiempo que tarda en absorberse el CO_2 emitido. En el caso de la quema de productos fósiles se emite grandes cantidades de CO_2 y pueden tardar muchos años en disiparse, mientras que las emisiones provenientes del uso de biomasa vegetal es mínima.

Tradicionalmente la conversión bioquímica de la biomasa en combustible como es el etanol ha sido emprendida a partir de la alimentación de caña de azúcar y celulosa como los cereales. Mediante la conversión de la celulosa en glucosa vía la hidrólisis ácidas o enzimáticas, seguidamente de la conversión de la glucosa en alcohol, por medio de la fermentación, es más fácil concebirla cuando la biomasa tiene altos contenidos de celulosa que de lignina (puesto que es no es fácil convertirla).

3.4.2.Biomasa animal

Es aquella que producen los seres que no son capaces de elaborar productos químicos sólo con la ayuda de la energía solar, como son los animales y los seres humanos. La biomasa utilizada para la Digestión Anaerobia debe tener alto contenido de humedad (80%-90% de humedad), compuesta principalmente por Polisacáridos, proteínas, lípidos y lignina; la combinación de las excretas con agua lo denominaremos purines.

Normalmente las granjas producen altos volúmenes de residuos húmedos en forma de excretas animales. Comúnmente estos residuos se esparcen en el campo utilizándolos así como abono debido a su valor nutritivo, pero, elevadas cantidades de estiércol puede provocar una sobre fertilización de los suelos y la contaminación de las cuencas hidrográficas, ya que tienen altos contenidos de fósforo y nitrógeno.

La acumulación de excretas sin cuidados, podrían producir enfermedades dañinas para el ser humano. Los residuos fecales humanos provenientes de las áreas urbanas son derivados para su tratamiento de diversas maneras, sin embargo en áreas rurales o pobres estos tratamientos son mínimos, es por ello que se encuentran en riesgo de salud. Existen muchos métodos a grande escala para el tratamiento de dichos residuos y luego utilizarlo como fertilizantes o

para proveer energía. El método más común es el de la digestión anaerobia para la producción del biogas y fertilizante. Pero hay que tener en cuenta que existen mínimos necesarios de determinadas cantidades del estiércol para la producción de biogás.

Como veremos más adelante las cantidades de sólidos totales (ST) en la biomasa es un factor importante que afecta la digestión, y puede ser manejada por ejemplo mediante la combinación con agua en las excretas para la conversión en purines, la relación de combinación con el agua podemos apreciarla en la tabla 2.

Tabla 2: Cantidad de agua necesaria a combinar a las excretas secas

Material	Sólidos Totales (%)	Litros de agua por kg. de desecho para obtener 8% de ST (L/kg)
Heces humanas	17	1,1
Estiércol de vaca	20	1,5
Caballos, bueyes y mulas	25	2,1
Cerdos	18	1,3
Ovejas	32	3
Gallinas	44	4,5
Cáscara de cacahuete	96,6	11,1
Hojas secas	50	5,3
Paja de arroz	92,6	10,6
Rastrojo y hojas de maíz	77	8,6
Papel periódico	93	10,6

Fuente: Biogás, Energía y fertilizantes de desechos orgánicos. Manual para el promotor de la tecnología

Existe las denominadas ecuaciones estequiométricas de Buswell que son aplicables a la fermentación en el proceso de tratamiento de excretas por técnicas anaeróbicas, según Yongfu, 1989:

$$C_n H_a O_b = (n - \frac{a}{4} - \frac{b}{2}) * H_2O + (\frac{n}{2} - \frac{a}{8} + \frac{b}{4}) * CO_2 + (\frac{n}{2} + \frac{a}{8} - \frac{b}{4}) * CH_4$$

Donde n, a y b son la cantidad de átomos de carbono, hidrógeno y oxígeno respectivamente contenidos en las moléculas de materia

orgánica degradadas. Como por ejemplo para la molécula de almidón ($C_6H_{10}O_5$), la formula sería como sigue:

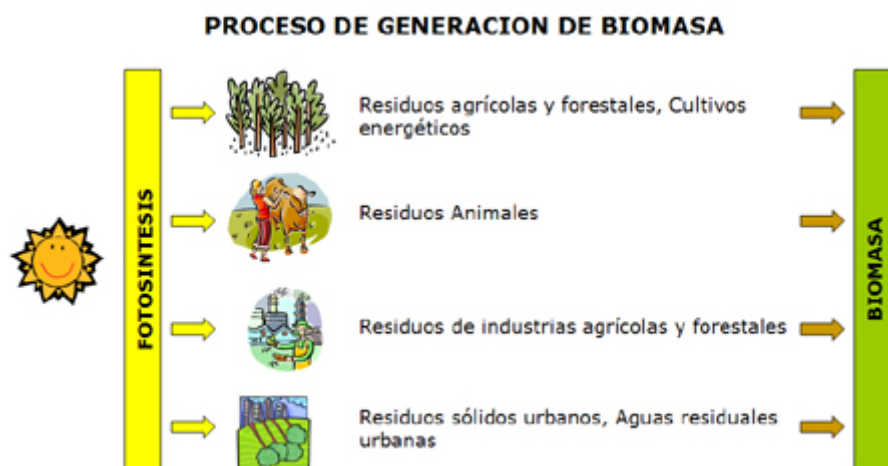
$$C_6H_{10}O_5 = \left(6 - \frac{10}{4} - \frac{5}{2}\right) * H_2O + \left(\frac{6}{2} - \frac{10}{8} + \frac{5}{4}\right) * CO_2 + \left(\frac{6}{2} + \frac{10}{8} - \frac{5}{4}\right) * CH_4$$
$$C_6H_{10}O_5 = H_2O + 3 * CO_2 + 3 * CH_4$$

Esto quiere decir que la fermentación anaerobia de almidón resulta en un 50% de metano. De acuerdo a David Hall, pionero del entendimiento de los combustibles provenientes de la biomasa:

“...Bio-Combustibles en forma de madera, residuos de cosecha, arbustos y excretas de animales; es todavía en estos días, la principal forma de energía para la mayoría de la humanidad, tal como ha sido desde el descubrimiento del fuego...”

En la figura 2 se muestra en términos generales cómo influye la fotosíntesis en el proceso de generación de la biomasa.

Figura 2: Proceso general de la generación de la biomasa



Fuente: www.contruible.es

En general, aquí presento las ventajas que ofrece el utilizar la biomasa de cualquier tipo:

- La producción de metano para su uso como combustible
- Los residuos se reducen a lodos, que tiene un alto contenido de nutrientes necesarios para los campos de cultivo por lo tanto pueden ser utilizados como abono o fertilizantes.
- Eliminación de bacterias durante el proceso de fermentación, que es un gran beneficio para la salud ambiental.

3.5.El biogás

El biogás es un producto derivado de la fermentación por medio de bacterias y en ausencia de oxígeno (es decir en el proceso de digestión anaerobia), a partir de excrementos humanos, de ganado vacuno, porcino y de aves, así como de restos vegetales y otros desechos orgánicos. Tiene diversas denominaciones, de las cuales nombramos algunas: Swamp gas, Marsh gas, Will o' the wisp, Gobar gas, etc.

Es un gas con alto porcentaje de metano (60% - 70%) que puede ser empleado en una cocina convencional sustituyendo a la leña. Este biogás también puede ser empleado en lámparas de gas para iluminación; en otras palabras, sirve como sustituto de la electricidad en el alumbrado, como combustible para la cocción de alimentos, y de pequeños motores eléctricos.

En la Tabla 4 mostraremos la comparación de las características que tiene el biogás con distintos tipos de combustibles.

Generalmente en el proceso de digestión anaerobia el 95% del carbono (C) es convertido en biogas y el 5% restante es transformado en biomasa microbiana. El 70% de la energía es retenida como CH_4 mientras que el 3-

5% es perdido como calor, teniendo en cuenta que el 5-7% es almacenado en la biomasa.

Diversas fuentes nos proporcionan datos acerca de la constitución volumétrica del biogás, del cual hemos escogido:

Metano CH_4	60-80%
Dióxido de carbono CO_2	20-40%
Nitrógeno N_2	0-5%
Oxígeno O_2	< 0,4%
Hidrógeno H_2	< 1%
Sulfuro de hidrógeno H_2S	< 0,1-3%
Amoníaco NH_3	trazas
Otras impurezas	trazas

Sin embargo es también interesante mostrar la tabla 3 correspondiente a las cantidades de materia que expulsan los animales relacionado con la cantidad de biogás que produce.

Tabla 3. Cantidad de biogás que puede producir los animales.

Tipo de animal o Residuo	Cantidad de excretas expulsadas en kg/día	Lbiogas/kg estiércol Húmedo	Sólidos totales %
Estiércol vacuno	12	15 – 40	18 - 20
Estiércol porcino	2.5	50 – 70	18
Estiércol aves Parrilleras	0.08	30 – 50	53
Estiércol aves Ponedoras	0.08	35 – 55	35

Fuente: Soluciones Prácticas

Tabla 4: Biogás en comparación con otros combustibles

Combustible	Unidades U	Poder Calorífico KWh/u	Uso	Rendimiento η	Poder Calorífico KWh/u	Equivalente en biogás m ³ /u	1m ³ biogás =u/m ³
Excretas	Kg	2,5	cocinar	12%	0,30	0,09	11,11
Madera	Kg	5,0	cocinar	12%	0,60	0,18	5,56
Carbón vegetal	Kg	8,0	cocinar	25%	2,00	0,61	1,64
Carbón mineral	Kg	9,0	cocinar	25%	2,25	0,69	1,45
Butano	Kg	13,6	cocinar	60%	8,16	2,49	0,40
Propano	Kg	13,9	cocinar	60%	8,34	2,54	0,39
Diesel	Kg	12,0	cocinar	50%	6,0	1,83	0,55
	L		Motor	30%	4,0	2,80	0,36
Corriente eléctrica	kWh	1	cocinar	67%	0,67	0,20	5,00
			Iluminación	9%	0,09	0,50	2,00
			Motor	80%	0,8	0,56	1,79
Biogás	M ³	5,96	cocinar	55%	3,28	1	1
			Luz	3%	0,18	1	1
			Motor	24%	1,43	1	1

Fuente: Ludwig Sasse. La planta de biogás GTZ.1984

La Tabla 5 nos mostrará los resultados provenientes de estudios genéricos de la composición del biogás

Tabla 5: Componentes del biogás en función del sustrato utilizado

Gases	Desechos agrícolas	Lodos Cloacales	Desechos industriales	Rellenos sanitarios	Características
Metano CH₄	30-80%	50-80%	40-80%	45-65%	Inflamable, Inodoro
CO₂	30-50%	20-50%	30-50%	30-55%	Forma ácido, inodoro, asfixiante
Vapor de agua	Saturación	Saturación	Saturación	Saturación	Corrosivo
H₂S	100-7000 Ppm	0-1000 ppm 0-1%	0-1000 ppm 0-1%	0-500 ppm	Corrosivo, inflamable, tóxico, olor
Hidrógeno H₂	0-2%	0-5%	0-2%	0-1%	Inflamable, Inodoro
Amoniaco NH₃	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	Corrosivo, Irritante
Nitrógeno N₂	0-15%	0-3%	0-1%	0-30%	Inerte, inodoro, Asfixiante
Oxígeno O₂	0-1%	0-1%	0-1%	0-5%	Corrosivo
Orgánicos	Trazas	Trazas	0-5 ppm	10 ppm	Corrosivos, Olores

Fuente: Coombs, 1990

Nota: $1 \frac{mg}{L} = 1 ppm$

Al quemar biogás se produce una llama azul, que tiene un poder calorífico de 5400 kcal/m³ y equivale a 0,61 L de diesel o a 0,54 L de petróleo crudo. El Biogás es inflamable pero su poder calorífico es menor que el metano puro. Por ello es importante aclarar que el biogás se puede utilizar como combustible sólo cuando el metano se encuentra en concentraciones mayores o iguales a 50%

El metano es un gas combustible, incoloro, inodoro, cuya combustión produce una llama azul y productos no contaminantes. Es el principal constituyente del gas natural, ya que más del 90% de este combustible es metano.

A continuación la Tabla 6 presenta las propiedades físicas y químicas del metano, como información básica

La tabla 6. Propiedades físicas y químicas del metano

Formula química	CH ₄
Peso molecular	16,04
Punto de ebullición (1atm)	-16,04°C
Punto de solidificación (1atm)	-182,5°C
Presión crítica	47,36 kg/cm ²
Temperatura crítica	-82,5°C
Gravedad específica	
Líquido (-164°C)	0,415
Gas (25°C y 1atm)	0,000658
Volumen específico (15,5°C y 1atm)	1,47 L/kg
Poder calorífico (15,5°C y 1atm)	9120 kcal/m ³
Aire requerido para combustión (m³/m³)	9,53
Limite de flamabilidad	5-15 por volumen
Rango de octano	130
Temperatura de ignición	65°C
Reacción de combustión	CH ₄ + 2O ₂ → CO ₂ + 2H ₂ O
O₂/CH₄ para combustión completa	3,98 por peso y 2 por vol.
COCO₂/CH₄ para combustión completa	2,74 por peso y 1 por vol.

Fuente: Alfredo Oliveros D. Tecnología energética y desarrollo. 1990.

Además, el porcentaje de metano depende del material de fermentación, es decir varía dependiendo del animal que produzca la materia prima, siendo aproximadamente:

Estiércol de gallinas	60%
Estiércol de cerdo	67%
Estiércol de vacas	55%
Pasto	70%
Desperdicios de cocina	50%

Ventajas de utilizar biogás:

- Si utilizamos el biogás como sustituto de combustibles fósiles, estamos preservando las materias primas fósiles y se protege el clima disminuyendo los gases por efecto invernadero
- Se aprovecha el calor del ambiente para la producción del biogás (en el proceso de digestión anaerobia)
- La generación de biogás puede ser continua

Refiriéndonos al impacto que tiene el biogás en el efecto invernadero, podemos decir que el CH_4 emitido a la atmósfera es considerado el responsable del 20% del calentamiento global de la tierra durante la última década y su contribución es un tercio del CO_2 . Estudios realizados en Estados Unidos señalan que entre un 5% y 10% de las emisiones totales de CH_4 a la atmósfera tienen su origen en el gas de relleno sanitario.

Por su capacidad para retener radiación infrarroja, un gramo de metano CH_4 equivale a 21 gramos de dióxido de carbono CO_2 en una escala de tiempo de 100 años, tomando en cuenta sus propiedades moleculares y su tiempo de residencia en la atmósfera. Un gramo de óxido nitroso equivale a 310 gramos de dióxido de carbono (PICC, 1996).

A continuación muestro la Tabla 7 donde nos da información sobre la cantidad de biogas necesario para poder utilizar diversos aparatos o instrumentos.

Tabla 7: Capacidad de uso del biogás como combustible

Uso	Especificaciones	Cantidad (m ³ /h)	Referencia
Cocina	Quemador 2"	0,33	D
	Quemador 4"	0,47	D
	Quemador 6"	0,64	D
	Quemador 2-4"	0,23-0,45	E
	Por persona/día	0,34-0,42	F
Lámpara de gas	De 100 bujías	0,13	F
	Por mantle	0,07	E
	De 2 mantle	0,14	D
	De 3 mantle	0,17	D
Motor a gasolina diesel (a)	Biogás/HP	0,45-0,51	E
Refrigeración	Por ft ³ de capacidad	0,028	D
	Por ft ³ de capacidad	0,034	E
Incubadora	Por ft ³ de capacidad	0,013-0,017	D
	Por ft ³ de capacidad	0,013-0,017	E
Gasolina (b)	Por L	1,33-1,87	E
Combustible Diesel (b)	Por L	1,50-2,07	E
Agua hervida	1 L	0,04	D

Fuente: Adaptación de National Academy of sciences.

- (a) basado en 25% de eficiencia
- (b) volumen equivalente de biogás a 1 L de combustible
- (c) volumen de biogás necesitado para hervir 1 L de agua
- (d) Gober gas Research Station, Etweh. India. 1971
- (e) New Alchemy Institute – West. California U.S.A 1973
- (f) Khadi and Village Industries Comission, Bombay. India

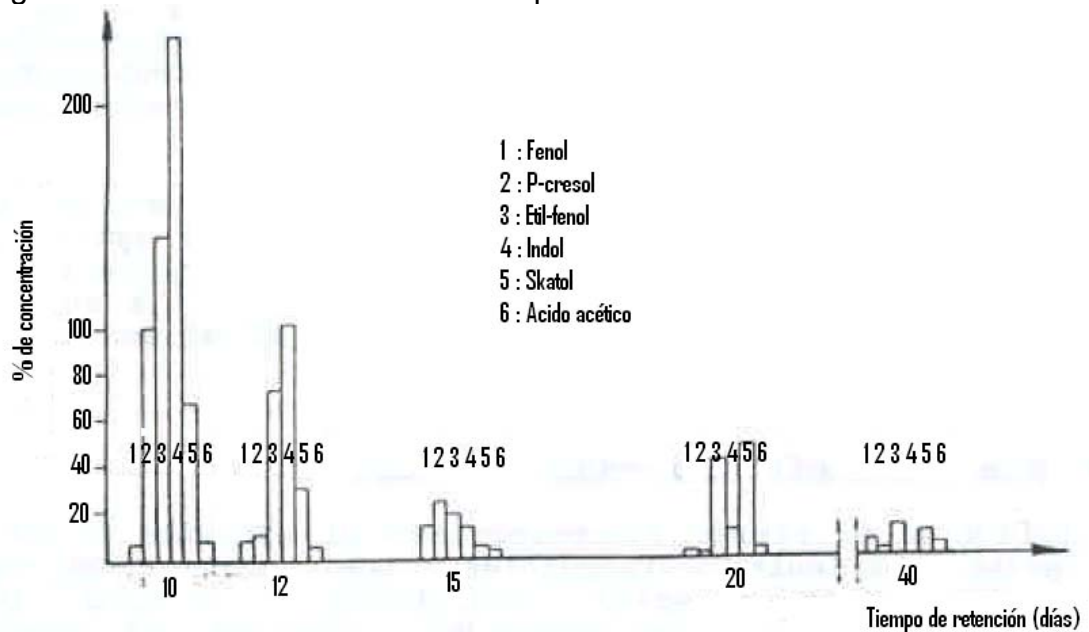
3.6.Lodos o fertilizantes

Llamado también Biol, es otro subproducto derivado de la digestión anaerobia de la biomasa; rico en fósforo, potasio y nitrógeno. Es negruzco, exenta de olores ofensivos, que sedimenta fácilmente y tiene un pH aproximadamente neutro.

Los efluentes carecen de olor debido a que las sustancias provocadoras del mal olor son reducidas en casi su totalidad en función al tiempo de retención, como podemos apreciar en la siguiente figura. La relación Carbono/nitrógeno (C/N) se ve reducida mejorando en forma general el efecto fertilizante del efluente.

La figura 3 nos muestra cómo varía el porcentaje de concentración de las sustancias que participan en el proceso de digestión, mientras que aumenta el tiempo de retención.

Figura 3: Reducción de las sustancias provocadoras de mal olor



Fuente: Instituto de Ingeniería rural. I.N.T.A. - Castelar

El proceso de digestión convierte el nitrógeno de los materiales orgánicos en amonio, una forma que es más estable cuando se limpian en el suelo. El amonio fijo en el suelo es absorbido fácilmente por las plantas, mientras que los desperdicios (estiércol) contienen nitrógeno oxidado en nitratos y nitritos, los cuales no son fijos al suelo y por lo tanto son fácilmente arrastrados por la corriente.

Cuando mencionamos la producción del biogas, se dijo que durante el proceso anaerobio, parte de la materia orgánica se transforma en metano, por lo que el contenido en materia orgánica es menor que el flujo de alimentación.

Inicialmente se ha considerado un producto secundario, pero actualmente se esta considerando de la misma importancia, o mayor, que el biogás ya que provee a las familias campesinas un fertilizante natural que mejora fuertemente el rendimiento de las cosechas. Además, la buena digestión de este producto, garantiza la baja carga de microorganismos patógenos y la ausencia de metales pesados y malos olores, por lo tanto hace que el

uso de los fertilizantes derivados de la digestión no genere peligro de contaminación.

Además si comparamos los contenidos de los nutrientes en el lodo resultante que será utilizado como fertilizante, con la descomposición de las excretas al aire libre, podemos observar que las pérdidas de nitrógeno es menor al utilizar el proceso de digestión anaerobia, va del 18% al 1%, siendo el efecto para el carbono de del 33% al 7%. Dentro del digestor no existen pérdidas apreciables para el fósforo, potasio, y calcio contenidos en las excretas.

El contenido de nitrógeno, fósforo y potasio comparado entre estiércol de bovino fresco y estiércol digerido anaeróbicamente durante 30 días, se puede apreciar en la siguiente tabla 8.

Tabla 8: Contenido de nitrógeno, fósforo y potasio en estiércol de bovino fresco y digerido anaeróbicamente

	Nitrógeno (%)	Fósforo (%)	Potasio (%)
Estiércol fresco	2,0 ± 0,08	0,6 ± 0,2	1,7
Estiércol digerido	2,6 ± 0,10	1,4 ± 0,2	1,0

Fuente: Gomez y Viniegra, 1979

Recientes estudios nos indican que es favorable tener una baja relación C/N en el lodo puesto que mejora las propiedades fertilizantes. El análisis de los resultados de la aplicación del efluente como fertilizante no es extrapolable, siendo conveniente basarse en ensayos propios. Aún así, se podrían obtener datos fiables después de 3 ó 5 años. Con varios años de abono se puede notar una mejora en la estructura del suelo, aumentando la proporción de la materia orgánica, que permite almacenar más agua. Cabe resaltar, que de ser necesario almacenar el abono, habría que cubrirlo para que el nitrógeno no volatilice.

4.Digestión Anaerobia

La fermentación es uno de los mecanismos de degradación de la biomasa más frecuente en la naturaleza, por el que las moléculas orgánicas complejas son descompuestas en sus componentes energéticos individuales de forma espontánea por medio de microorganismos. Cuando la fermentación sucede en condiciones rigurosas de ausencia de oxígeno (medio anaerobio) y se prolonga el tiempo necesario, da lugar a una mezcla de productos gaseosos (principalmente metano y dióxido de carbono), conocido como biogás y a una suspensión acuosa de materiales sólidos (lodos o fangos), en la que se encuentran los componentes difíciles de degradar, junto con el nitrógeno, el fósforo y los elementos minerales inicialmente presentes en la biomasa. Este proceso es el que actualmente se suele denominar digestión anaerobia.

Ventajas que implica la digestión anaerobia:

- No requiere Oxígeno
- Produce de 3-20 veces menos lodos que los tratamientos aerobios (20-150 vs 400-600 kg biomasa/m³ DQO)
- Produce biogás, con suficientes contenidos de metano
- El subproducto lodos es utilizable como abono o fertilizante
- Reducción de energía necesaria
- Eficiente a elevadas cargas de DBO
- Preservación de la actividad aún cuando el sistema no ha operado por largos periodos de tiempo
- Evita los malos olores entre el 90 y 100%
- Existen pruebas que han demostrado que los sistemas de biogas pueden matar:
 - 90%-100% de huevos de anquilostomiasis
 - 35%-90% de ascarid (lombrices intestinales)
 - 90%-100% de fasciolas sanguinea “blood flukes” (esquistomas fasciolas que se encuentran en el agua y en los caracoles que viven en los arrozales y estanques

Desventajas que implica la digestión anaerobia:

- Más lento que el tratamiento aerobio, es decir la digestión anaerobia requiere mayores tiempos de contacto es decir mayor tiempo de retención hidráulica.
- Más sensible a los choques tóxico.
- Sensible a los factores que afectan el proceso de digestión (temperatura, pH, velocidad de carga, etc.)
- El proceso de digestión anaerobia no genera calor
- La disponibilidad de agua para hacer la mezcla con el estiércol que será introducida en el digestor.
- La cantidad de ganado que posea la familia (tres vacas son suficientes como mínimo)

4.1. Partes que conforman el proceso de digestión

4.1.1. Cámara de carga

En esta zona se prepara la alimentación del digestor, es decir lugar donde se mezcla el estiércol con agua (purines). Dependiendo del tipo de digestor, puede estar conectado directamente con el digestor, o puede ser un simple balde como lo veremos al detallar el digestor tipo bolsa.

La cámara de carga debe encontrarse aislada térmicamente, para poder luego llevar la mezcla a temperatura del material que esta en fermentación dentro del digestor.

Si es posible, se recomienda tener un sistema de agitación con el fin de homogenizar los purines.

4.1.2.Digestor o cámara de digestión

El digestor anaerobio es también conocido como biodigestor, o reactor anaerobio. Pero ¿qué es un digestor? Es el lugar donde se produce la fermentación, de manera simple se podría decir que es un contenedor el cual está cerrado herméticamente, dentro del cual se deposita el material orgánico como excremento y desechos vegetales, exceptuando los cítricos ya que éstos acidifican y modificarán el proceso microbiológico, que veremos más adelante.

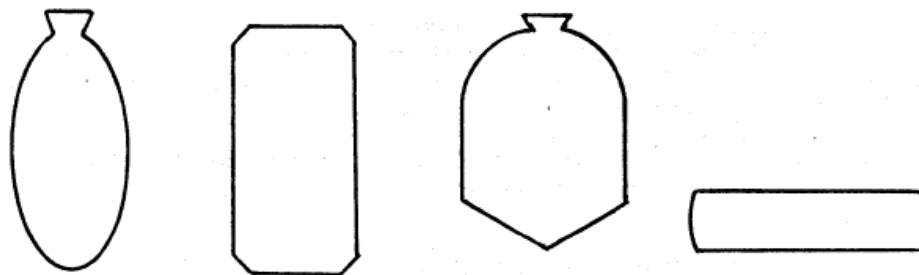
No importa cual sea el sistema a utilizar, la cámara de digestión deberá cumplir los siguientes requisitos:

- Impermeable al agua y al gas, para evitar las pérdidas de líquido en la digestión, con el consecuente peligro de contaminación; y la pérdida de gas que disminuirá la eficacia y provocaría el riesgo de explosiones en las cercanías del digestor.
- Aislante, las pérdidas de calor deben ser evitadas al máximo, puesto que el mantenimiento de la temperatura de digestión es logrado con el aporte de calor externo y por lo tanto todo ahorro en este sentido redundará en una mayor cantidad de energía neta disponible. Este aspecto es particularmente importante para los digestores que trabajan a temperaturas mesofílicas y termofílicas.
- Mínima relación Superficie/Volumen, a fin de ahorrar material y mano de obra, como así también reducir la superficie de intercambio de calor.
- Estabilidad estructural, capaz de soportar cargas estáticas y dinámicas; incluyendo un cuidadoso estudio del suelo,

especialmente en los que serán construidos bajo tierra, donde se pueda afectar alguna napa freática.

La figura 4 nos muestra que existen diversas formas de digestores, pero en realidad son derivados de principales formas:

Figura 4. Diferentes tipos de digestores



Fuente: Instituto de Ingeniería rural. I.N.T.A. - Castelar

Cada una cuenta con ventajas y desventajas, por ejemplo; las de tipo horizontal son mejor adaptables a zonas con algún tipo de impedimento en el subsuelo.

Con respecto a la producción de gas, no existen por el momento evidencias de peso que demuestren que la forma de la cámara de carga tenga importancia en la producción de gas, sin embargo los digestores de última generación, de mayores rendimientos, son propensos a las formas de cilindros o paralelepípedos verticales.

Los materiales de construcción más utilizados son el hierro, hormigón armado, mampostería (ladrillos y cemento), plásticos (OVC, PU, PRFV, etc.). El uso de los mismos, dependen de los costes y de la disponibilidad. Los digestores pueden contar con un sistema de agitación incluido, pero ello presupone costes adicionales, mucho aún si trataremos de implantarlo a una comunidad andina.

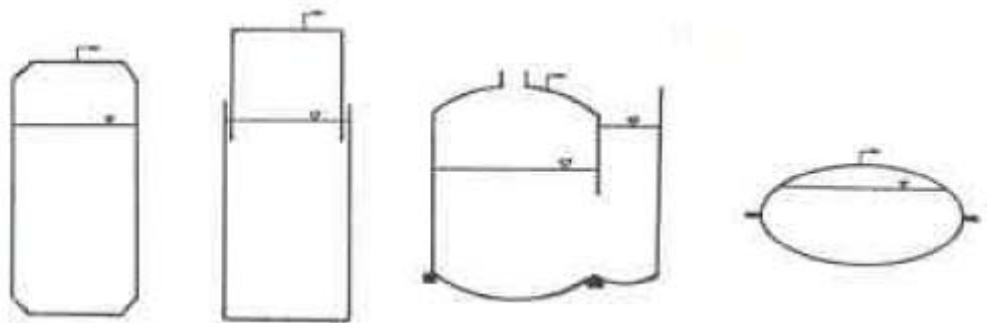
Como medida adicional, podría recomendarse el precalentamiento de la carga de alimentación y la optimización de la aislación, a fin de

reducir al mínimo el requerimiento de calor para mantener la temperatura estable, pero no es un factor decisivo.

4.1.3. Almacenamiento del biogás

Los digestores de biogás necesitan normalmente un almacén de gas para guardar el gas producido en las horas que no son utilizadas, puesto que el gas consumido no es proporcional al que se produce (la producción es mayor al consumo). Es por ello que las dimensiones de este almacenamiento dependerá del consumo de biogás. Por lo tanto cuanto más concentrado esté el consumo en un periodo de tiempo corto, mayor será la necesidad de almacenaje. Los diferentes diseños de este elemento son presentados en la figura 5

Figura 5. Diversos tipos de almacenamiento



Fuente: Instituto de Ingeniería rural. I.N.T.A. - Castelar

4.1.4. Gasómetros

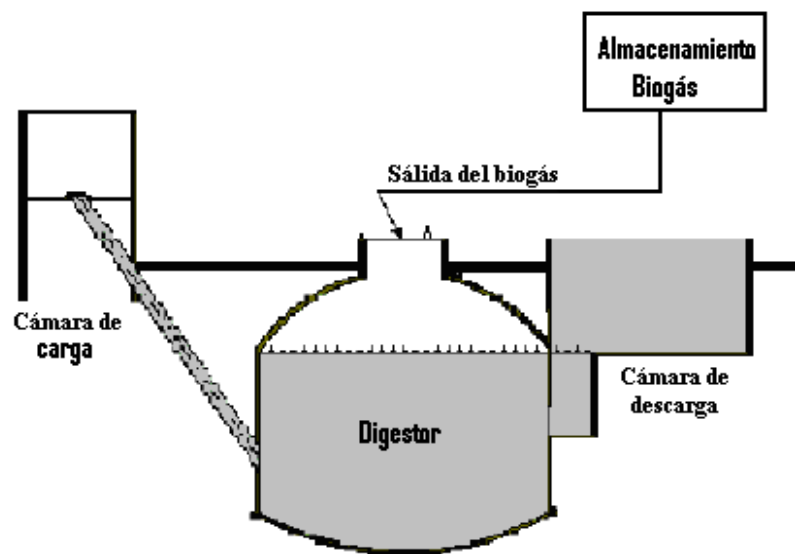
Para que el biogás se mantenga a bajas presiones en el aparato de almacenamiento de biogás es necesario que se cuente con dispositivos como gasómetros o válvulas de seguridad. Existen diversos tipos de gasómetros y tienen diferentes características, en el anexo 9.1 se detalla la válvula que se ajustará a nuestros fines, es más que nada, un modelo rústico.

4.1.5. Cámara de descarga

Lugar donde se depositan los lodos o fertilizantes, su diseño y dimensionamiento depende fundamentalmente del uso que se le da al efluente. Como mínimo se deberá tener un volumen 2 a 3 veces superior al de descarga diaria

En la figura 6 podemos apreciar los diferentes elementos que conforman el proceso de digestión anaerobia, el elemento que varía en forma es la cámara de digestión que dependiendo del tipo varía su construcción y forma.

Figura 6. Elementos que conforman el proceso de digestión



4.2. Proceso microbiológico y bioquímico de la digestión anaerobia

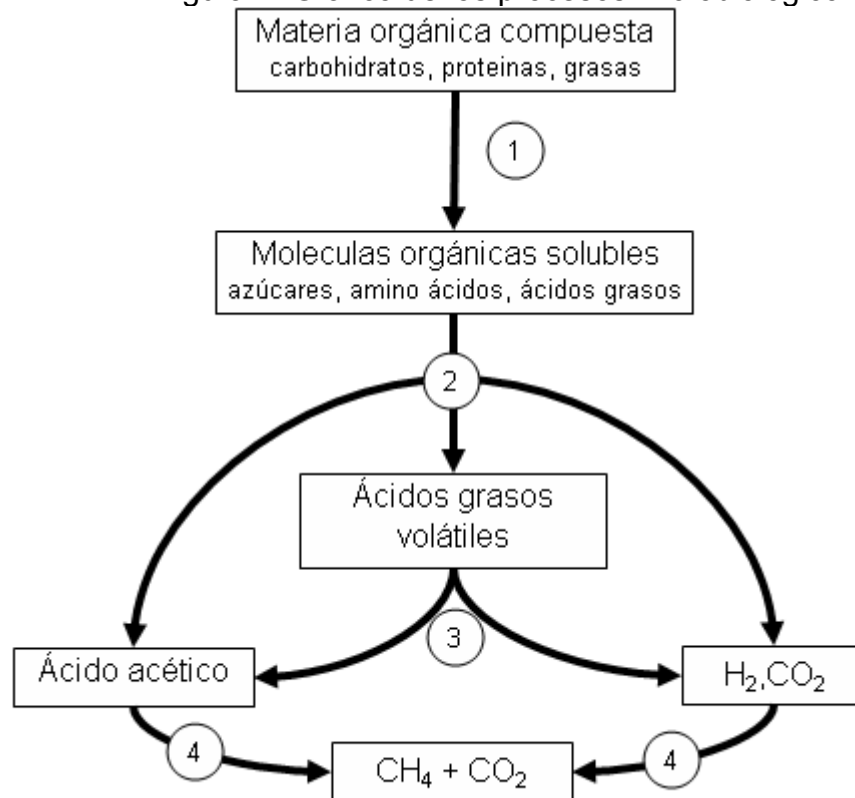
El proceso microbiológico del metano está descrita desde diversas perspectivas, sin embargo, los autores coinciden en 4 fases importantes en la evolución de las bacterias

- Hidrólisis
- Acidogénesis
- Acetogénesis
- Metanogénesis

①
②
③
④

La figura 7 nos grafica la conexión o relación que existe entre las diversas etapas del proceso microbiológico y bioquímico de la digestión anaerobia.

Figura 7. Gráfico de los procesos microbiológico



4.2.1. Hidrólisis

Denominada también la fase de Licuefacción, es el primer paso necesario para la utilización o degradación de los biopolímeros microbianos complejos (que constituyen la biomasa) en forma de

biopartículas o moléculas más simples. Es decir, la materia orgánica formada por polímeros (como pueden ser las proteínas, carbohidratos y lípidos) es hidrolizada por la acción de enzimas producidas por bacterias hidrolíticas o excretadas por las bacterias fermentativas, transformándose en compuestos simples y solubles tales como: aminoácidos, glicéridos, péptidos (compuesto polímero o proteína formada por la unión de dos o más moléculas de aminoácidos) y azúcares.

La hidrólisis es importante ya que de ella dependen los alimentos para los grupos posteriores de bacterias; además elimina cualquier traza de oxígeno disuelto que pueda quedar en la materia orgánica. Suele ser difícil la distinción entre esta fase y la de acidogénica (acidogénesis), puesto que algunas moléculas son absorbidas directamente por los microorganismos sin ser descompuestas, es decir, se forman directamente los ácidos volátiles simples.

La etapa hidrolítica puede ser la etapa limitante de la velocidad del proceso global, sobretodo tratando residuos con alto contenido en sólidos. Incluso en casos donde las fases acidogénicas o metanogénicas son consideradas como pasos limitantes, la hidrólisis puede afectar el conjunto del proceso (Pavlostathis y Giraldo-Gómez, 1991).

No todas las partículas del sustrato tienen la misma facilidad para degradarse, existen factores que afectan la hidrólisis:

- Los factores principales que afectan a los procesos de degradación de las partículas son el pH (solubilización de las partículas) y las variaciones de Temperatura.
- Las partículas grandes que tienen bajo ratio de área por volumen son más lentas en la degradación que las partículas pequeñas Hills y Nakano (1984). La dependencia del tamaño de las partículas ha

motivado a desarrollar diversos modelos que se basan en éste parámetro para simular la velocidad del proceso hidrolítico.

- Con certeza, los almidones, proteínas y la celulosa se degradan a diferentes ritmos para un rango de 15°C-35°C (O'Rourke).
- Tanto la Lignina como las ceras retardan la hidrólisis de las partículas de las que están relacionadas o asociadas.
- La presencia de algún compuesto tóxico o inhibidor de la población bacteriana son responsables de la producción de enzimas extracelulares. Por ejemplo, la concentración de amonio influye negativamente en la generación de peptonas Gallert et al. (1997); La concentración total de ácidos grasos volátiles limitan la tasas de hidrólisis de carbohidratos y proteínas, Angelidaki et al. (1999); además, Henze et al. (1995) considera que la tasa de hidrólisis está inhibida por la concentración de oxígeno y nitrógeno.

Según O'Rourke (1968) el tiempo que toma la degradación entre los lípidos, celulosa y proteínas son diferentes. La tabla 9 presenta los resultados de estudios hechos en digestores o reactores continuos, alimentados con desperdicios domésticos el cual nos demuestran los siguientes datos, que pueden ser tomados como meros indicativos.

Tabla 9. Variación del tiempo de retención en función de la temperatura en diversos componentes de la biomasa

Componente	Temperatura (°C)	Tiempo de retención de sólidos (días)				
		5	10	15	30	60
Lípidos	35	0,01	0,17	0,11	0,06	0,04
	25	0	0,01	0,09	0,07	0,03
	20	0	0	0,02	0,05	0,03
	15	-	0	0	0	0
Celulosa	35	1,95	1,21	0,62	0,38	0,21
	25	0,29	0,27	0,27	0,34	0,16
	20	0,09	0,14	0,13	0,14	0,10
	15	-	0,05	0,03	0,10	0,08
Proteínas	35	0,10	0,05	0,03	0,02	0,01
	25	0,09	0,04	0,03	0,02	0,01
	20	0,08	0,04	0,03	0,02	0,01
	15	-	0,03	0,02	0,01	0,01

Fuente: Soluciones Prácticas - ITDG

4.2.2. Acidogénesis o etapa fermentativa

En esta fase las bacterias formadoras de ácidos, llamadas acidogénicas que son facultativas (que viven tanto en presencia como ausencia de oxígeno), producen varios compuestos simples o ácidos simples de cadena corta causados por la fermentación ácido - bacteriana, que serán los productos finales para el metabolismo anaerobio de las mismas.

Además del ácido acético que serán consumidos por las bacterias metanogénicas, se forman otros ácidos volátiles como hidrógeno y dióxido de carbono así como los compuestos propiónico y butírico, que tendrán que ser oxidados por bacterias acetogénicas a sustratos que puedan utilizar las metanogénicas.

En todo caso, podemos nombrar las acciones que se dan en esta etapa de fermentación como son:

- Fermentación de carbohidratos solubles
- Fermentación de aminoácidos
- Y la fermentación de hidratos de carbono y aminoácidos

Los factores que afectan en esta etapa:

La concentración Hidrógeno y la influencia del pH son los principales inhibidores de la oxidación anaerobia de ácidos grasos de cadena larga (AGCL). En todo caso, en la unión de las fases de hidrólisis y acidogénesis, las bacterias toman la materia orgánica virgen con sus largas cadenas de estructuras carbonadas y las van rompiendo y transformando en cadenas más cortas y simples (ácidos orgánicos) liberando hidrógeno y dióxido de carbono. Este trabajo es llevado a cabo por un complejo de microorganismos de distinto tipo que son en su gran mayoría anaerobios facultativos.

4.2.3. Acetogénesis

La acetogénesis es el proceso a través del cual bacterias anaerobias producen acetato a partir de diversas fuentes de energía (por ejemplo, hidrógeno) y de carbono (por ejemplo, dióxido de carbono). Las diferentes especies bacterianas que son capaces de realizar la acetogénesis se denominan colectivamente acetógenos.

Algunos de los productos formados por la fermentación pueden ser metabolizados directamente por los organismos metanogénicos, sin embargo existen otros productos que necesitan ser transformados en productos más sencillos como los acetatos o hidrógeno a través de las bacterias acetogénicas.

Los procesos acetogénicos necesitan de energía, por lo que necesitan ser ayudados por los organismos metanogénicos u otros organismos consumidores de hidrógeno (Stams, 1994) y la energía libre de reacción depende de la presión parcial de hidrógeno del medio.

Tabla 10: Reacciones acetogénicas principales que ocurren en los sistemas anaerobios (Stams, 1994)

Reacciones acetogénicas	ΔG° (KJ)
Etanol y láctico	
$\text{Etanol} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Acetato} + \text{H}^+ + 2\text{H}_2$	+ 9,6
$\text{Lactano}^{-1} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Acetato}^{-1} + \text{H}^+ + 2\text{H}_2 + \text{HCO}_3^-$	- 4,2
Ácidos grasos	
$\text{Acetato}^{-1} + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}^+ + 4\text{H}_2 + 2\text{HCO}_3^-$	+104,6
$\text{Propionato}^{-1} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Acetato}^{-1} + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ + 3\text{H}_2$	+76,1
$\text{Butirato}^{-1} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Acetato}^{-1} + \text{H}^+ + 2\text{H}_2$	+48,1
$\text{Valerato}^{-1} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{Acetato}^{-1} + 2\text{H}^+ + 4\text{H}_2$	+96,2

Aminoácidos

Alanina+3H ₂ O → Acetato ⁻¹ +HCO ₃ ⁻ +NH ₄ ⁺ +H ⁺ +2H ₂	+7,5
Aspartato ⁻¹ +4H ₂ O → Acetato ⁻¹ +2HCO ₃ ⁻ +NH ₄ ⁺ +H ⁺ +2H ₂	-14,0
Leucina+3H ₂ O → Isovalerato ⁻¹ +HCO ₃ ⁻ +NH ₄ ⁺ +H ⁺ +2H ₂	+4,2
Glutamato ⁻¹ +4H ₂ O → Propionato ⁻¹ +2HCO ₃ ⁻ +NH ₄ ⁺ +H ⁺ +2H ₂	-5,8
Glutamato ⁻¹ +7H ₂ O → Acetato ⁻¹ +3HCO ₃ ⁻ +NH ₄ ⁺ +3H ⁺ +5H ₂	+70,3

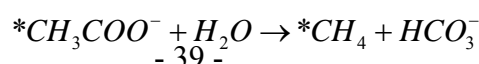
Inhibidores en la etapa o fase de la acetogénesis:

- La acumulación de hidrógeno molecular es el principal inhibidor de la acetogénesis (Ahring y Westermann, 1987 y Fukuzaki et al. 1990)
- La oxidación del propiónico sólo será posible si la presión parcial del H₂ está por debajo de 5,8*10⁻⁵ atmósferas (Boone y Mah, 1987).
- Otras sustancias consideradas inhibidoras de ésta fase son, el propio ácido acético (producto de la acetogénesis) (Ahring y Westermann 1988) o los ácidos grasos de cadena larga (Galbraith et al 1971)
- Es afectado por el valor del pH.

4.2.4.Metanogénesis

Esta es la etapa por el cual los ácidos orgánicos simples producidos en las etapas anteriores se convierten en sustratos para la descomposición, estabilización y producción del metano, mediante la producción de bacterias metanogénicas, estrictamente anaerobias. La producción del metano proviene por dos vías en esta fase:

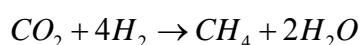
- **Metanogénesis del acetato** : El 70% del metano producido en un digestor proviene de la decarboxilación de acetato de acuerdo a la siguiente reacción:



- 39 -

Es por esta razón que el acetato es el principal precursor de la producción del metano. Según Huser et al. (1982) esta fase es muy sensible a las variaciones de acidez y temperatura; el pH óptimo para la producción del metano ronda los 7,4-7,8 y se hace inactiva para valores menores a 6,8 mientras que se consideran aceptables trabajos a 15-35°C de temperatura.

- **Metanogénesis del hidrógeno** : Algunos microorganismos que han aislado en las etapas anteriores, han catalizado al metano de acuerdo a la siguiente reacción:



Los factores que afectan el crecimiento del organismo son la Temperatura (que debe rondar los 33°C) y el pH (ronda en 7)

Tabla 11. Principales reacciones de la metanogénesis según Stams,1994 y Fergusson,1987

Reacciones hidrogenotróficas	ΔG° (KJ)
$4H_2 + H^+ + 2HCO_3^- \rightarrow \text{Acetato} + 4H_2O$	-104,6
$4H_2 + 4S^0 \rightarrow 4HS^- + 4H^+$	-112
$4H_2 + 2HCO_3^- + H^+ \rightarrow CH_4 + 3H_2O$	-135,6
$4H_2 + 4SO_4^{2-} + H^+ \rightarrow HS^- + 4H_2O$	-151,9
$4H_2 + 4\text{fumarato} \rightarrow 4\text{succinato}$	-344,6
$4H_2 + NO_3^- + 2H^+ \rightarrow NH_4^+ + 3H_2O$	-599,6
Interconversión formato hidrógeno	
$H_2 + HCO_3^- \rightarrow \text{formato} + H_2O$	-1,3
Metanogénesis acetoclástica	
$\text{Acetato} + H_2O \rightarrow HCO_3^- + CH_4$	-31

Metanogénesis a partir de otros sustratos

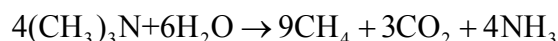
Fórmico



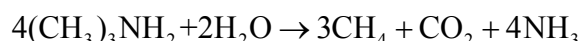
Metanol



Trimetil-amina



Monometil-amina



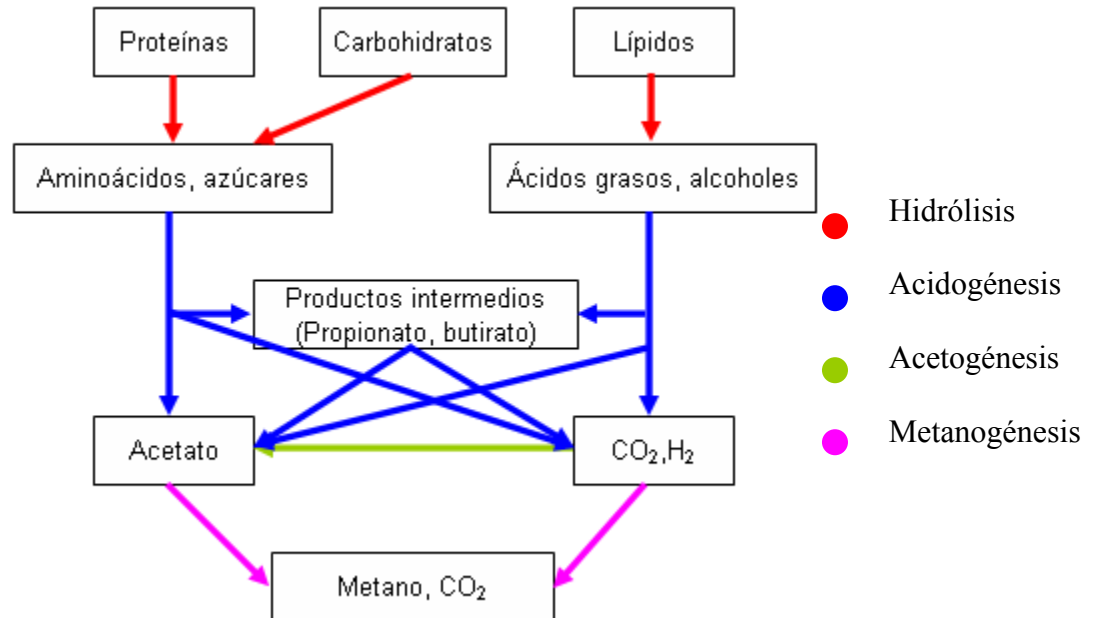
La acción de las bacterias productoras de metano en esta fase, es el factor determinante para el desarrollo de la fermentación anaerobia, debido a que estos microorganismos son muy sensibles a los cambios bruscos de temperatura y de acidez, además varían de acuerdo a la toxicidad de ciertos materiales presentes en el medio, ocasionando la reducción inclusive la paralización de la digestión. A continuación la tabla 12 presenta un cuadro comparativo que resume las características de las fases hidrólisis, acidogénica, acetogénica y metanogénica

Tabla 12: Características de las fases microbiológicas de la biomasa

Característica	Fase Hidrólisis	Fase Acidogénica	Fase Acetogénica	Fase Metanogénica
Tipo de Bacteria	Bacterias hidrolíticas	Bacterias facultativas (pueden vivir en presencia de bajos contenidos de oxígeno)	Bacterias facultativas (pueden vivir en presencia de bajos contenidos de oxígeno)	Bacterias anaeróbicas estrictas (no pueden vivir en presencia de oxígeno)
Velocidad de reproducción	Depende del contenido del sustrato	Reproducción muy rápida (alta tasa reproductiva)		Reproducción lenta (baja tasa reproductiva)
Elementos inhibidores	pH, tamaño de partículas, metales pesados dentro del sustrato	Poco sensibles a los cambios de acidez y temperatura	Sensibles a la concentración del hidrógeno, la acidez y AGCL	Muy sensibles a los cambios de acidez y temperatura
Productos	Aminoácidos, azúcares, ácidos grasos, alcoholes	Propionato, butirato, acetato, dióxido de carbono e hidrógeno	Principal producto acetatos.	Principales productos finales, metano y CO_2

El procedimiento detallado del proceso microbiológico y bioquímico de la digestión anaerobia se demuestra en la Figura 8:

Figura 8. Proceso microbiológico de la digestión anaerobia



4.3. Parámetros importantes que afectan la digestión

Los cambios en determinados parámetros pueden modificar la conducta de las bacterias, entre ellas encontramos aquellas que ocasionan mayores impactos en la operación de la digestión que describo a continuación. Hay que tener en cuenta que dependiendo del autor o referencia que se tome, las cantidades recomendadas de los parámetros difieren, por lo tanto es recomendable que se reciban los datos como orientativos.

4.3.1. Valor de acidez (pH)

El pH proviene de "Potencial Hidrógeno", y se dice que un medio es ácido cuando los valores del pH varían de 0-7 y será alcalino si 7-14. Para garantizar un correcto desarrollo microbiológico habría que trabajar en torno a pH neutros, debido a que la acidez o alcalinidad afecta fundamentalmente a la actividad enzimática de los microorganismos. Para medir el pH se utiliza un aparato electrónico llamado peachímetro.

Los organismos productores de metano como los metanógenos – extremófilos (extremófilos, porque pueden prosperar bajo extrema acidez, alcalinidad o salobridad, condiciones que alguna vez se pensaron intolerables para la vida) viven en un ambiente sintrópico (es el fenómeno de una especie que vive de los productos de otra especie) relacionado con otros microorganismos que consumen la materia prima (en la etapa de la acidogénesis y/ acetogénesis) para producir ácidos simples o los ácidos grasos de cadena corta (AGCC) como parte de su metabolismo. Los ácidos simples o AGCC son esenciales para el proceso metabólico de los metanógenos, además reducen el pH en la fase líquida. Como los productores de ácidos se ahogan en sus propios derivados acéticos, los metanógenos cooperan con el proceso de producción del metano, pero, si las bacterias metanogénicas no pueden convertir los AGCC rápidamente como son formadas las bacterias acetogénicas, los AGCC se acumularán y causarán un descenso en el pH del medio.

El objetivo del balance de acidez es crear una relación de trabajo estable entre la población microbiana en el digestor. Para conseguirlo es necesario que se mantengan constantes las temperaturas de funcionamiento así como las características de los sustratos; ya que cualquier variación rápida de las condiciones puede romper este equilibrio o balance en el digestor y hará que la población microbiana cambie drásticamente. Un ejemplo clásico son las sobrecargas orgánicas o la presencia de un inhibidor de la etapa metanogénica, que pueden provocar desequilibrios entre la producción y el consumo de ácidos grasos volátiles, produciendo la acumulación de éstos y el consiguiente descenso del pH, produciéndose la “acidificación del reactor”. Es decir, si el pH se torna ácido, la acción de las bacterias metanogénicas se inhibe, aumentando la proporción de gas carbónico en el Biogás (Taiganides, et al., 1963)

Las bacterias que producen el metano son extremadamente sensibles a la influencia que tiene la acidez en el medio, por lo tanto es necesario mantener un equilibrio ácido-base. El rango óptimo de pH en el medio es de 6,6-7,6; debajo de ese rango el medio se convierte en ácido y como se explicó en párrafos anteriores, se inhibe la actividad de las bacterias metanogénicas y el gas producido tendría contenidos pobres de metano, efectos similares se detectan a valores del pH por encima de 8,5.

Las causas por las cuales se pueden acidificar la fase líquida contenida dentro del digestor son:

- Un cambio excesivo de la carga
- El permanecer por largo tiempo sin recibir carga
- La presencia de productos tóxicos en la carga
- Un cambio amplio y repentino de la temperatura interna

En todo caso, existen diversas recomendaciones para moderar la caída del pH, entre ellas:

- Detener la carga del digestor y permitir durante cierto tiempo que la población metanogénica reduzca la concentración ácida y que ello genere la elevación del pH a unos valores razonable. Además esta detención hace más lenta la actividad bacteriana, por lo tanto también se reduce la formación de AGCC. Entonces, una vez que el pH se sitúa en los valores razonables, se puede continuar con la alimentación de la carga del digestor, a niveles bajos para ir la incrementando lentamente y así evitar caídas abruptas del pH.
- Una segunda alternativa es la adición de sustancias tampones o buffers para elevar el pH sin cambiar el ritmo de carga del digestor. La ventaja de esta propuesta es que el pH puede rectificarse rápidamente en comparación que la propuesta

anterior. Para ello se puede añadir al sistema una sustancia reguladora, que puede ser, hidróxido cálcico, carbonato de sodio (que previene la precipitación del carbonato cálcico, pero es muy caro) o agua con cal, y que permite el sistema entre valores del pH comprendidos entre 6,5 y 8.

Tabla 13. Efectos del pH en la producción del Biogás según Metcalf-Eddy, 1995

Valor de pH	Efecto
7,0-7,2	Óptimo
$\geq 6,2$	Retarda la acidificación
$\leq 7,6$	Retarda la amonización

4.3.2. Temperatura de funcionamiento

Se puede generalizar que a altas temperaturas las tasas de reacción química y biológicas son más rápidas que a bajas temperaturas. La velocidad de reacción de los procesos biológicos depende de la velocidad de crecimiento de los microorganismos responsables, que a su vez dependen de la temperatura (Van Lier 1995)

La temperatura es un factor que repercute en la eficiencia del digestor, se puede operar en tres rangos de temperaturas:

- **Baja temperatura:** Temperaturas menores a 35°C, denominado rango Psicrofílico, el máximo rendimiento para este rango de temperaturas se logra entre 15-18°C. Con temperaturas inferiores a 15°C la producción del gas es independiente de la misma y el rendimiento es bajo.
- **Media temperatura:** Temperaturas situadas entre 29-40°C con óptimo entre 35-40°C (algunos autores consideran 28-33°C), denominado rango Mesofílico; la producción de gas aumenta un 1% por cada grado que se eleve la temperatura.

- **Alta temperatura:** Trabajo con temperaturas entre 40-65°C con óptimo entre 55-60°C, denominado rango Termofílico. A temperaturas superiores a 65°C, el balance energético se vuelve desfavorable, ya que el sistema de digestión es más sensible a pequeñas variaciones de temperaturas y el proceso de control del digestor es complejo.

En la figura 9 podemos apreciar que las bacterias metanogénicas son más sensibles a los cambios de temperatura que los otros microorganismos del digestor. Esto se debe a que la velocidad de crecimiento de los otros grupos bacterianos es mayor que las metanobacterias. Así la temperatura repercute en el ciclo de vida de las bacterias, siendo el óptimo de funcionamiento alrededor de los 35°C que permite el crecimiento de las bacterias con mayor velocidad de producción del metano.

Hay que tener en cuenta que es muy importante el mantener la temperatura crítica de funcionamiento, puesto que variaciones de más o menos 1°C en un día, puede incentivar en los organismos productores de metano un periodo de inactividad, la acumulación de ácidos provoca que el índice del pH decaiga, obstaculizando así la eficacia en todo el sistema del biogás (Gunnerson y Stuckey 1986).

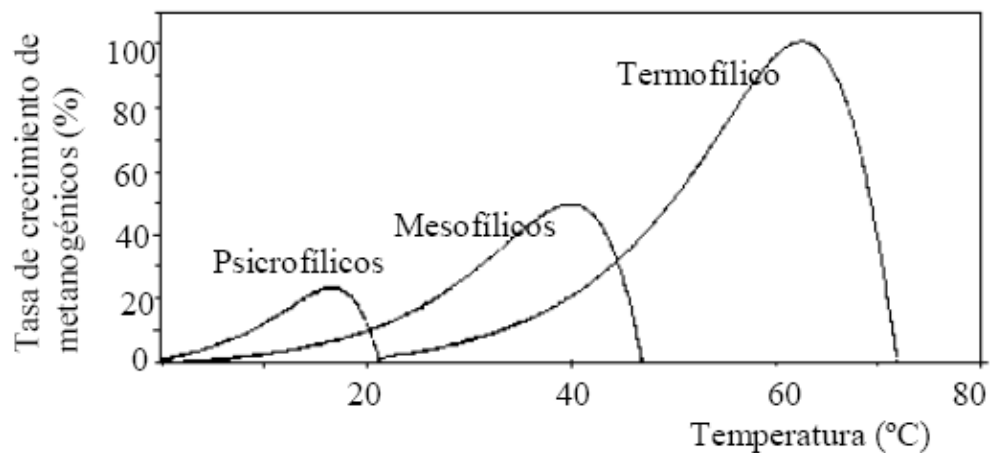
En general se recomienda los siguientes límites en las variaciones de temperatura para evitar la inhibición en el proceso de fermentación:

- Rango Psicrófilico: $\pm 2^{\circ}\text{C/h}$
- Rango Mesófilico: $\pm 1^{\circ}\text{C/h}$
- Rango Termófilico: $\pm 0,5^{\circ}\text{C/h}$

Además hay que añadir que las variaciones de temperatura entre el día y la noche no representan problemas para aquellas plantas de

digestores subterráneos, ya que la temperatura de la tierra por debajo de una profundidad de un metro es prácticamente constante.

Figura 9. Dependencia de la constante de crecimiento de la Temperatura (Van Lier, 1993)



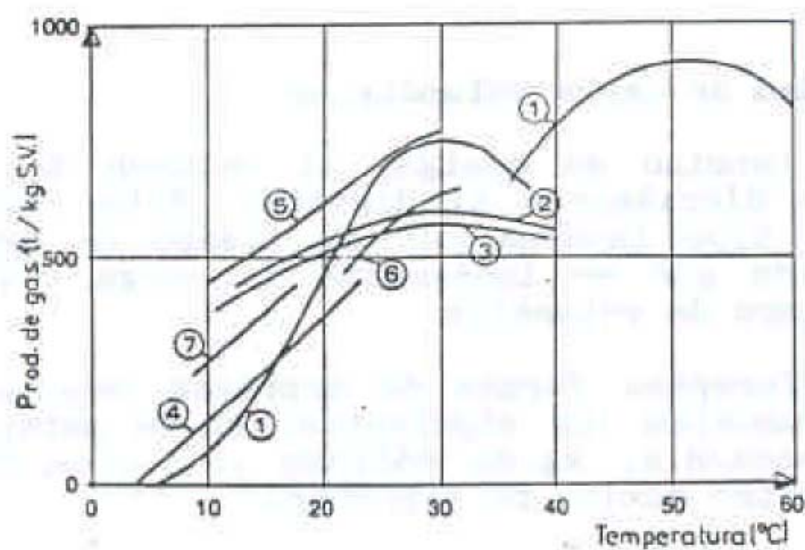
La ventaja que presenta el trabajar en rango termofílico radica en la mayor eliminación o inactivación de organismos patógenos (organismos que son capaces de causar enfermedad), que incide en la utilización del efluente producido en la digestión, como fertilizante orgánico. Un tratamiento termofílico por encima de los 50°C garantiza la higienización y la digestión anaerobia (Angelidaki y Ahring 1997). Además, los digestores que trabajan en rangos termofílicos degradan más fácilmente la materia orgánica, es de esperarse mayores cantidades de biogás producido en menos tiempo de retención en el digestor, a su vez representa casi el doble de la producción en los rangos mesofílicos, esto implica que los digestores pueden tener la mitad de volumen que uno que opera en el rango mesofílico, y aún mantener así la misma eficiencia en el proceso.

Sin embargo la desventaja reside en que a altas temperaturas, el menor cambio en las condiciones del sistema afectaría la eficiencia del digestor, puede causar un descenso en el ritmo metabólico del proceso debido a la degradación de las enzimas (molécula formada principalmente por proteína que producen las células vivas y que actúa

como catalizador y regulador en los procesos químicos del organismo: las enzimas son esenciales para el metabolismo) que son esenciales para la vida celular; además es posible que se exija una fuente adicional de energía para mantener los volúmenes del digestor a una temperatura alta constante (mas o menos a 55°C). Por otro lado, es cierto que la tasa de producción de metano aumenta a altas temperaturas, pero lo mismo ocurre con la cantidad de amoniaco, que a su vez inhibe el rendimiento del digestor. Entonces, los estudios sobre la digestión termofílica pierden interés en países tropicales, especialmente en las áreas rurales de estudio, donde la disponibilidad de energía es escasa o un factor limitante para cualquier actividad.

En instalaciones de lodos recientes se han instalado técnicas interesantes como la combinación de dos fases de digestión, una primera de alta carga en el rango termófilo y una segunda con menor carga en el rango mesofílico. Con este sistema se aprovechan las ventajas del termofílico (la reducción de patógenos) y se evitan los posibles problemas de inestabilidad. (Han et al., 1997; Oles et al., 1997).

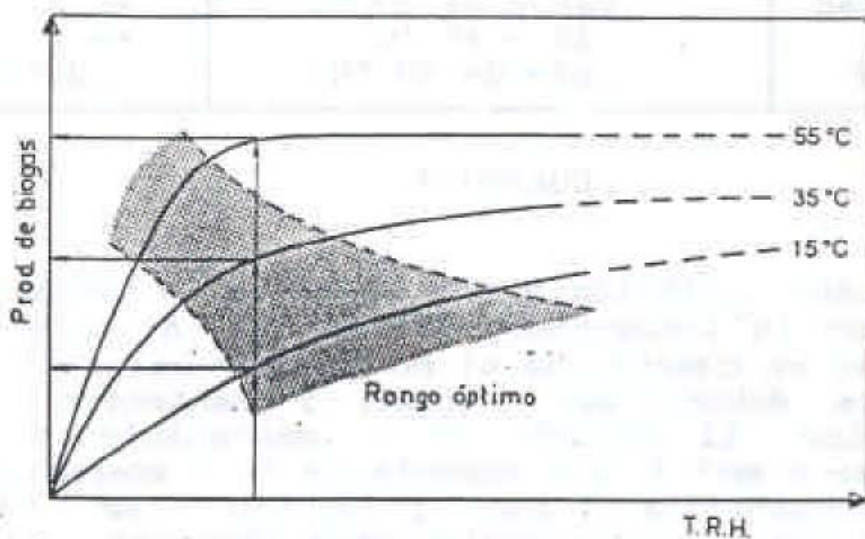
Figura 10. Representación de la evolución de la actividad biológica, conforme la temperatura aumenta. Los números representan diversas referencias.



Fuente: Instituto de Ingeniería rural. I.N.T.A. - Castelar

También es deducible que la temperatura está relacionada inversamente con los tiempos en que la biomasa debe permanecer en el digestor, es decir con el tiempo de retención hidráulico (TRH). En la figura 11 podemos apreciar que a medida que la temperatura aumenta, la producción de biogás también aumenta, por lo tanto requiere menos tiempo de retención hidráulica.

Figura 11. Variación de la producción de biogás con el tiempo de residencia



Fuente: Instituto de Ingeniería rural. I.N.T.A. - Castelar

4.3.3. Contenido de sólidos

Es un factor importante en el proceso anaerobio. Si la alimentación es muy diluida, los microorganismos no tienen alimento suficiente para sobrevivir, por el contrario, una alimentación muy concentrada reduce la movilidad de las bacterias y por lo tanto la efectividad del proceso, al dificultar el acceso de aquellas a su fuente de alimentación.

Los sólidos totales están formados por los sólidos fijos y los sólidos volátiles; y es una medida que se hace en materia seca, primero se quita la humedad calentando la carga de alimentación o los purines a aproximadamente 105°C.

$$\text{Sólidos totales}(\%) = ST(\%) = \frac{\text{peso}_{105^{\circ}\text{C}} - \text{tara}}{\text{peso muestra}} * 100$$

Los sólidos fijos están conformados por las sales minerales y otros componentes no biodegradables. Mientras que los sólidos volátiles están formados por los componentes orgánicos de la biomasa, no implicando esto que sea digerible al 100%; sin embargo es un parámetro fácil de determinar y se aproxima a la fracción biodegradable de la materia prima o del sustrato a utilizar, para medir los sólidos volátiles es necesario calentar o quemar la materia prima seca a 200-600°C, luego el valor será la medida de los sólidos orgánicos perdidos a esas condiciones.

$$\text{Sólidos Volátiles}(\%) = SV(\%) = \frac{\text{peso}_{105^{\circ}\text{C}} - \text{peso}_{550^{\circ}\text{C}}}{\text{peso muestra}} * 100$$
$$\text{cenizas}(\%) = \text{Sólidos Totales}(\%) - \text{Sólidos Volátiles}(\%)$$

Es recomendable que la digestión anaerobia se produzca con contenido en sólidos totales menores al 10% (algunos autores consideran un intervalo entre 5-12%), es decir contenido de sólidos volátiles en torno al 6-8%. Esto nos indica que la biomasa adecuada para utilizar es aquella que tenga alto contenido de agua. Se ha encontrado que en el verano de algunos países (de 25-27°C), la concentración óptima de sólidos volátiles es de 6%, mientras que a temperaturas ligeramente más bajas en primavera (18-23°C) la concentración óptima es de 12% (Yongfu et al. 1989).

Bajas concentraciones de sólidos en los purines no permitirá que el digestor sea utilizado eficientemente, puesto que el biogás producido tendrá bajas cantidades de metano que es el factor importante para su quema y uso posterior. Además puede producir una separación en la alimentación (purines/biomasa), de modo que los sólidos más pesados se hundan y formen lodos, mientras que los sólidos más ligeros floten de manera que forman espuma o escoria en la parte más superior del líquido. Ésta espuma o escoria puede secar formando una alfombra sólida evitando que el gas se libere del líquido y por otro lado

bloqueando las tuberías. Estos accidentes no ocurrirían si el porcentaje de sólidos totales sean mayores que 6%.

Por lo tanto el contenido en sólidos totales en los purines, presentadas en la tabla 14, influye en el dimensionamiento cualitativo pero no determinante del digestor y en el tiempo de duración del proceso.

Tabla 14. Propiedades de excrementos de animales típicos según Marimba (1978), NAS (1981), Makhijani (1976)

Animal	Estiércol húmedo (kg/día)	Biogás (L/día)	Sólidos Totales (%)	Sólidos Volátiles (%ST)
Búfalos	14	450-480	16-20	77
Vacas	10	280-340	16-20	77
Cerdos	5	280-340	20-25	80
100 gallinas	7.5	420-510	45-48	77
Humanos	0.2	11-14	15-20	90

Estos valores pueden variar de acuerdo al peso de los animales, de lo que comen y depende de las condiciones climatológicas. Un clima caliente y seco puede causar la evaporación del agua de los excrementos antes de la recolección para su estudio posterior, causando cantidades aparentemente grandes de sólidos totales. Por otro lado en climas húmedos ocasionan efectos opuestos al descrito anteriormente.

Para una correcta medida de las características de los excrementos de los animales a utilizar, sería adecuado un estudio en el campo donde se instalará el digestor anaerobio, por lo tanto en el lugar donde se utilizará el biogás.

Observemos que los sólidos volátiles contenidos en las excretas de los animales rondan el 80% de los sólidos totales. En realidad la tasa de sólidos volátiles no es un buen instrumento para medir la digestión de la biomasa. La lignina y otros sólidos indigeribles se quemarán a 500°C

mientras que los sólidos digeribles como los azúcares, dejarán un depósito de carbono cuando se caliente.

Como podemos apreciar en la tabla anterior, el contenido de sólidos totales en las excretas de animales varía entre 15%-30%, sin embargo es recomendable que los valores en los purines sean de aproximadamente 8%-12%; es por ello que las excretas deben ser mezcladas con agua antes de llevarlas al digestor.

4.3.4. Nutrientes

La variación de los nutrientes incurre en las velocidades en el proceso de digestión anaerobia (alimentación de los microbios). La biomasa necesita para su desarrollo, el suministro de una serie de nutrientes minerales, además de una fuente de carbono y de energía. Para que se produzca el crecimiento y la actividad microbiana, estos elementos han de estar presentes y disponibles en el medio y su ausencia o escasez pueden reducir la velocidad del proceso de digestión anaerobia. Los principales nutrientes que presenta el sistema anaerobio son nitrógeno, sulfuro, fósforo, hierro, cobalto, níquel, molibdeno, selenio, y pequeñas cantidades de otros componentes (Speece, 1987).

Los valores mínimos necesarios de concentración de nutrientes para el correcto crecimiento de los microorganismos se muestran en la siguiente tabla 15, según Henze, 1995.

Tabla 15. Rangos de concentración de nutrientes necesarios para el correcto crecimiento de las bacterias anaerobias (Henze, 1995)

	g/kg SSV	g/kg DQO
Nitrógeno	80-120	55-85
Fósforo	10-25	7-18
Azufre	10-25	7-18
Hierro	5-15	4-11

El carbono, es la fuente principal de alimentación de las bacterias y componente principal del biogás. Procede especialmente de los hidratos de carbono contenidos en la biomasa (celulosa y azúcares), que serán posteriormente degradados por los microorganismos para su crecimiento. El problema se presenta cuando se combina la biomasa con lignina, ya que no es digerida con facilidad, como lo puede ser la celulosa, puesto que este compuesto es escasamente atacable por los microorganismos (a pesar que también es una fuente de carbono), por ese motivo el periodo fermentativo es más largo.

El nitrógeno, es fuente importante para la sintetización de proteínas de los organismos vivientes. La deficiencia de nitrógeno incapacita a las bacterias para metabolizar todo el carbono presente, que conllevaría a perder eficacia de degradación. Mientras que un abuso de nitrógeno hace que, al no poder ser utilizado en su totalidad, se acumule en el medio, generalmente en forma de NH_3 (amoníaco), que elimina bacterias o inhibe el crecimiento de las mismas, especialmente de las metanogénicas; normalmente en materiales ricos en nitrógeno, la descomposición es fácil y la producción de biogás es rápida.

Por todo lo descrito anteriormente, la relación C/N es un índice significativo referido a la digestibilidad y al rendimiento potencial de la biomasa, por lo tanto varía dependiendo de la calidad u origen del sustrato de la biomasa. Veamos algunas relaciones conocidas en la tabla 16:

Tabla 16. Relación C/N de diversos tipos de biomasa.

Tipo de Biomasa	Relación C/N
Lodos de depuradora	6-10
Residuos Urbanos	18
Estiércol de vacuno	25
Estiércol de cerdo	15
Estiércol de aves	7-15
Paja de trigo	150
Paja de avena	48
Hojas de hortalizas	11-19
Algas marinas	19
Serrín	200-500

Para el proceso de la digestión anaerobia, se recomienda ratios que varían entre 10-30 (otros autores 25-30). Si el ratio es demasiado alto o demasiado bajo (por ejemplo de 8:1), el proceso de la digestión se ralentiza pudiendo ocasionar inclusive su parada, ya que la reproducción de las bacterias se inhibe debido al valor elevado de la alcalinidad. La relación del índice es directa con la producción del metano; es decir, si el ratio disminuye o escapa de los rangos recomendados, entonces el contenido de metano del biogás disminuye.

Las necesidades de fósforo de las bacterias, rondan las cifras de 1/150 (P/C) en relación con el carbono, y de 1/5 (N/C) con el nitrógeno. Mientras para otros autores como Speece, 1987 las relaciones recomendables son C/N 15-30:1, y la C/P de 75-113:1. El exceso de estas sustancias no suele tener mayor importancia, mientras que su defecto puede inhibir la fermentación.

Las necesidades de azufre son menores que la de fósforo, la mayor parte de la biomasa contiene suficiente cantidad. Pero un exceso de azufre puede producir las denominadas sulfobacterias, que convierten los compuestos azufrados en sulfuro de hidrógeno (SH_2), gas tóxico y de muy mal olor, que produce graves problemas de corrosión cuando se quema el biogás.

También se ha mencionado la necesidad de sales minerales, sin embargo hay que tener en cuenta que un exceso de las mismas, como de metales alcalinos (sodio, potasio), alcalinotérreos (calcio, magnesio) o metales pesados (cinc, cobre, cadmio, níquel, hierro, cobalto, etc.) pueden inhibir el proceso de digestión.

El contenido del carbono en el estiércol de bovino es excesivo, como lo es también el contenido de nitrógeno en el estiércol de cerdo; de allí la posibilidad y ventaja de alimentar al digestor con las excretas mezcladas de varias especies animales, lo que permite balancear su

contenido en nutrientes e incrementar así, la eficiencia del proceso de producción de biogás. (Persson et al., 1979)

4.3.5. Sustancias tóxicas

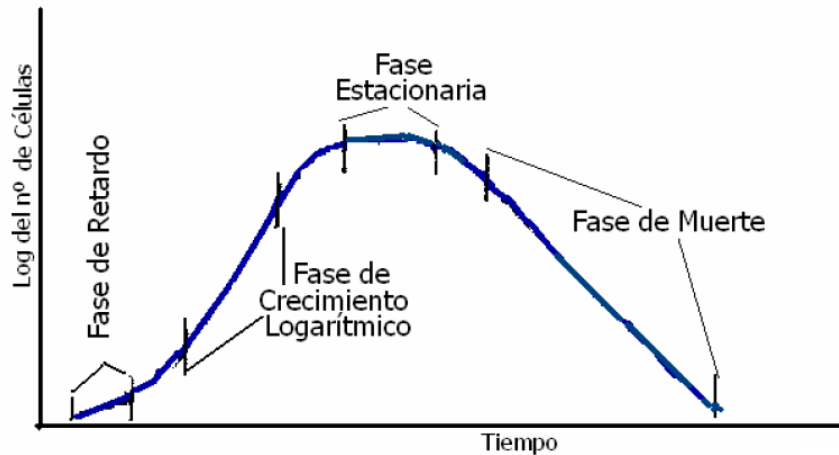
La concentración del sustrato generalmente determina la actividad bacteriana, debido a que la velocidad de crecimiento o metabolismo de la microflora aumenta con la concentración, llegando a un punto en que estabiliza y, dependiendo del caso concreto, puede llegar a disminuir (ocasionado por la inhibición del sustrato) dicha actividad bacteriana.

La evolución de la actividad bacteriana se presenta en la figura 12, donde se divide en cuatro etapas muy diferenciadas:

- **Fase de retardado:** Al inicio del ciclo de vida de las bacterias, representa el tiempo requerido para que los microorganismos se aclimaten a sus nuevas condiciones ambientales. Este tiempo se puede acortar mediante la adición de materiales ricos en bacterias que se encuentran en plena actividad, inciden principalmente en los digestores discontinuos que deben ser arrancados frecuentemente.
- **Fase de crecimiento logarítmico:** tanto el tiempo de generación como la capacidad de procesar alimentos, nos indicarán la facultad que tiene la célula para dividirse
- **Fase estacionaria:** Cuando la población microbiana permanece constante; se da por agotamiento del sustrato o nutrientes necesarios para el crecimiento; o debido a que la muerte de células viejas nivela el crecimiento de células nuevas.
- **Fase de degradación o muerte logarítmica:** Se da cuando la tasa de muerte de células viejas es mucho mayor que la producción de células nuevas; por lo tanto los microorganismos se ven forzados a

metabolizar su propio protoplasma si reposición del mismo, puesto que la concentración de alimento disponible es mínima.

Figura 12. Curva de crecimiento bacteriano (Metcalf-Eddy, 1995)



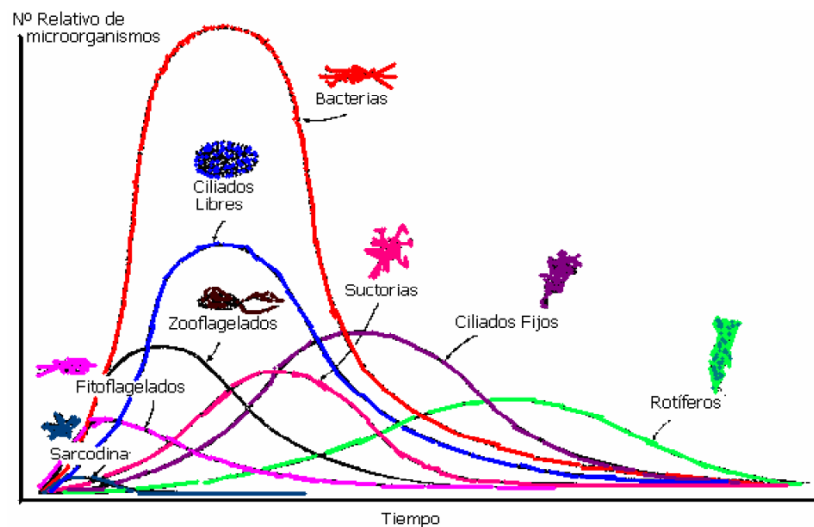
Los indicadores principales que muestran inhibición en el proceso son:

- Disminución en la producción de metano
- Incremento de la concentración de AGCC en el medio

Por lo tanto una sustancia es un tóxico o un sustrato dependiendo de su concentración; también la temperatura juega un papel importante en el efecto tóxico de determinados compuestos (amonio, sulfuro, ácidos grasos volátiles, etc.). Las bacterias metanogénicas son generalmente las más sensibles, aunque en general todos los grupos de microorganismos que participan en el proceso son afectados.

Hay que considerar además, que el proceso de digestión anaerobia no interviene solo una única especie de población microbiana. A su vez cada tipo de microorganismos tiene su propia curva de crecimiento; y como se dijo anteriormente las curvas en función del tiempo estarían determinadas por la existencia de alimentos y/o nutrientes y factores ambientales (temperatura y pH), ello se puede observar en la figura 13.

Figura 13. Crecimiento relativo de microorganismos en el curso de la estabilización de un residuo orgánico en medio líquido (Metcalf-Eddy, 1995)



Como sustancias tóxicas se pueden considerar:

- Existen diversas concepciones sobre las cantidades que afectan a la actividad microbiana en el proceso de digestión. El amoníaco NH_3 (producidas por un exceso de nitrógeno en la biomasa) es una sustancia tóxica para el proceso microbiológico. Según Anderson (1982), hay que mantenerse por debajo de 80 ppm, mientras que Gunnerson y Stuckey (1986) sugieren que aún podrían tolerarse cantidades altas como de 1500 y 3000 ppm. Por otro lado Marchaim (1992) indica que los primeros síntomas de inhibición se presentan con concentraciones de 8000 ppm. Este tipo de situación se presenta raramente en zonas rurales de países en vías de desarrollo debido a las limitaciones en el contenido de nitrógeno en el suelo, los alimentos para los animales y seres humanos.
- Sales minerales y sustancias orgánicas como los pesticidas o detergentes, metales pesados.
- Ácidos volátiles en concentraciones superiores a 2000 ppm para la fermentación mesofílica y de 3600 para la termofílica inhibirá la digestión, como así una elevada concentración de nitrógeno y amoníaco pueden destruir las bacterias metanogénicas.

- Sustancias de altos niveles de DBO (demanda bioquímica de oxígeno), debido que producen la sobrealimentación de las bacterias además de producir la inhibición de la digestión.
- Determinados medicamentos como por ejemplo, los antibióticos ingeridos o inyectados a los animales también son considerados como sustancias tóxicas, compuestos aditivos en su alimentación (en piensos), pesticidas y herbicidas pueden ocasionar efectos adversos en la las bacterias anaeróbicas, particularmente en los metanógenos. Como ejemplos puntuales podemos citar, Lincomycin, que frecuentemente se utiliza para evitar la peste porcina, y monensin, utilizado en el tratamiento vacuno, ambos antibióticos que pueden dañar éstas bacterias anaerobias y por lo tanto detener la producción de metano.

La tabla 17 presenta ciertos inhibidores comunes, sin embargo estos valores deben tomarse como orientativos, porque las bacterias tienen la capacidad de adaptarse a condiciones que en un principio las afectaba notablemente.

Tabla 17. Inhibidores más comunes en el proceso microbiológico de la digestión

Inhibidores	Concentración Inhibidora
SO₄	5000 ppm
NaCl	40000 ppm
Nitrato (según contenido de nitrógeno)	0,05 mg/ml
Cu	100 mg/l
Cr	200 mg/l
Ni	200-500 mg/l
CN (después que se han domesticado las bacterias metanogénicas a 2-10 mg/ml)	25 mg/l
ABS (detergente sintético)	20-40 mg/l
Na	3500 – 5500 mg/l
K	2500 – 4500 mg/l
Ca	2500 – 4500 mg/l
Mg	1000 – 1500 mg/l

Fuente: La energía de la biomasa. Francisco Jarabo Friedrich

4.3.6. Tiempo de retención hidráulica

El Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) es la proporción entre el volumen del reactor o digestor, dividido por la carga diaria. El TRH así como la velocidad de carga son parámetros de diseño que definen el volumen del digestor y también influyen en la eficiencia del digestor de biogás. Si el TRH es demasiado corto, las bacterias son desalojadas del digestor más rápidamente de lo que pueden reproducirse frenándose así el proceso.

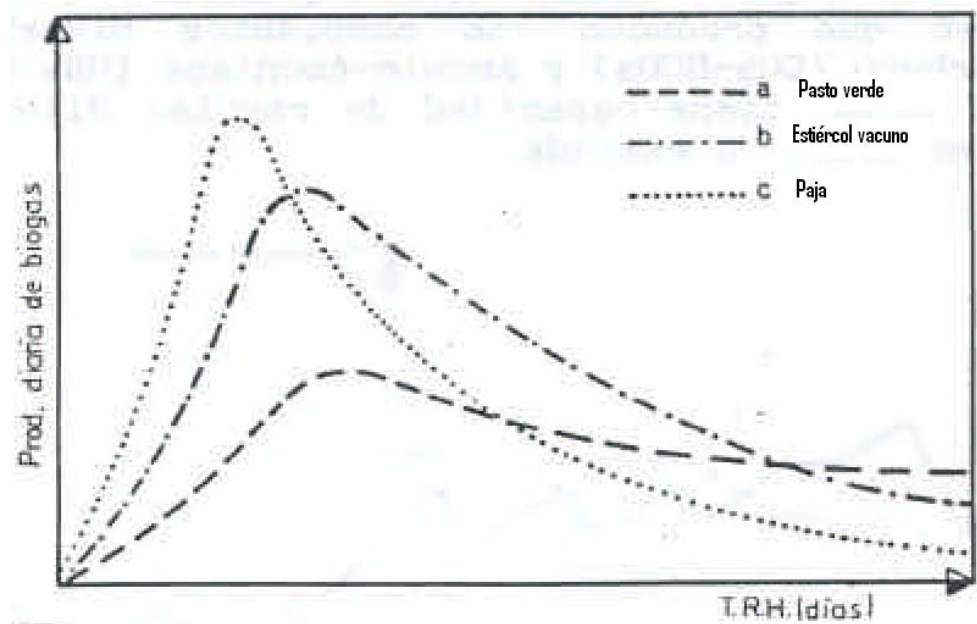
$$TRH = \frac{\text{Volumen del digestor}}{\text{volumen diario de carga}}$$

La cantidad de materia orgánica degradada aumenta al aumentar el TRH, mientras que la producción volumétrica de metano (producción por unidad de reactor) disminuye una vez superado el óptimo; por lo tanto es necesario determinar para cada tipo de residuo y de digestor el tiempo de retención que optimiza el proceso.

Los TRH están relacionados con dos factores, el tipo de sustrato y la temperatura del mismo. La selección de un rango de mayores temperaturas conllevaría a una disminución en los tiempos de retención requeridos, por lo tanto, serán menores los volúmenes de digestor necesarios para un determinado volumen de material.

Los sustratos que contengan mayor proporción de carbono retenido en moléculas como la celulosa, demandará mayores tiempos de retención para ser totalmente digeridos. Veremos en la figura 14, cómo varían las necesidades del TRH para diferentes sustratos. Elementos que tienen más contenidos de celulosa demandarán mayor TRH para digerirse.

Figura 14. Producción diaria del biogás vs TRH



Fuente: Instituto de Ingeniería rural. I.N.T.A. – Castelar

Si tomamos valores indicativos a una temperatura mesófila, resultaría la siguiente tabla 18:

Tabla 18. TRH de acuerdo a la materia prima

Materia Prima	T.R.H
Estiércol vacuno líquido	20-30 días
Estiércol porcino líquido	15-25 días
Estiércol aviar líquido	20-40 días

Fuente: Instituto de Ingeniería rural. I.N.T.A. – Castelar

Resientes diseños de cámaras de digestión procuran lograr grandes superficies internas sobre las cuales se depositan como una película las bacterias u otros sistemas que logran retener a las metanogénicas pudiéndose lograr de este modo TRH menores (Filtro anaeróbico y UASB)

Como se comentó en el apartado de la temperatura como parámetro que afecta el proceso de la digestión anaerobia, existen diferentes etapas del proceso microbiológico que se ve afectada directamente por

la temperatura e inversamente con el TRH, para ello muestro la tabla 19.

Tabla 19. Rangos de Temperaturas y de Tiempos de retención en la fermentación anaerobia.

Fermentación	Rango de temperatura (°C)			Tiempo de retención (días)
	Mínimo	Óptimo	Máximo	
Psicrofílica	4-10	15-18	25-30	>100
Mesofílica	15-20	28-33	35-45	30-60
Termofílica	25-45	50-60	75-80	10-16

Fuente: Instituto de Investigación Porcina, 2003

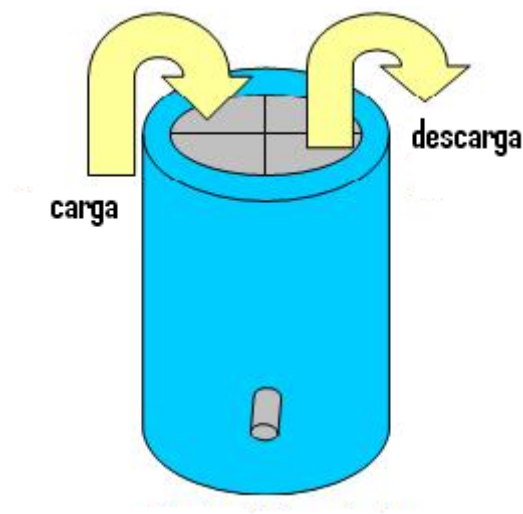
5. Tecnologías existentes

5.1. Tipos de digestores según la frecuencia de carga de alimentación

5.1.1. Digestores tipo Batch/Lote

Caracterizado por cargarse una vez de forma total, y luego descargarse cuando concluye el proceso de digestión (figura 15). Se tiene un orificio de alimentación que es tapado mientras se digiere; pero luego de la descarga (que se da en otro orificio) se vuelve a destapar para recibir la siguiente carga. La materia abastecida será la que se digiera y produzca el biogás, por lo mismo, no hay recambio de carga que permita sostener los niveles de biogás producido; para ello después de su respectivo TRH se descarga y se vuelve a alimentar.

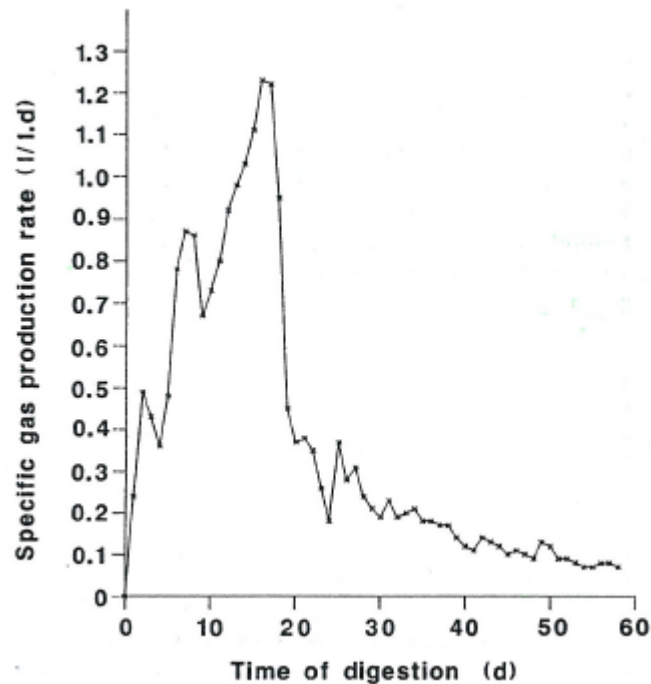
Figura 15. Modelo de alimentación batch del digestor



Usualmente al inicio del proceso, o mejor dicho la primera carga representa el 5% - 30% del volumen del digestor, puesto que el gas despedido no será utilizable, ya que tendrá altos contenidos de dióxido de carbono, por lo tanto hay un desfase de tiempo entre 1 -14 días antes de la primera producción de biogás (esto también depende de la temperatura de los purines o carga así como la cantidad utilizada en el arranque).

Como podemos observar en la figura 16, la tasa de producción de biogás en un digestor tipo batch es alta al inicio llegando así a un máximo, pero luego decae bruscamente, debido a que los metanógenos ya no tienen más posibilidades de desarrollarse.

Figura 16. Tasa de producción de biogás con respecto al tiempo



Fuente: Running a biogas programme. David Fulford

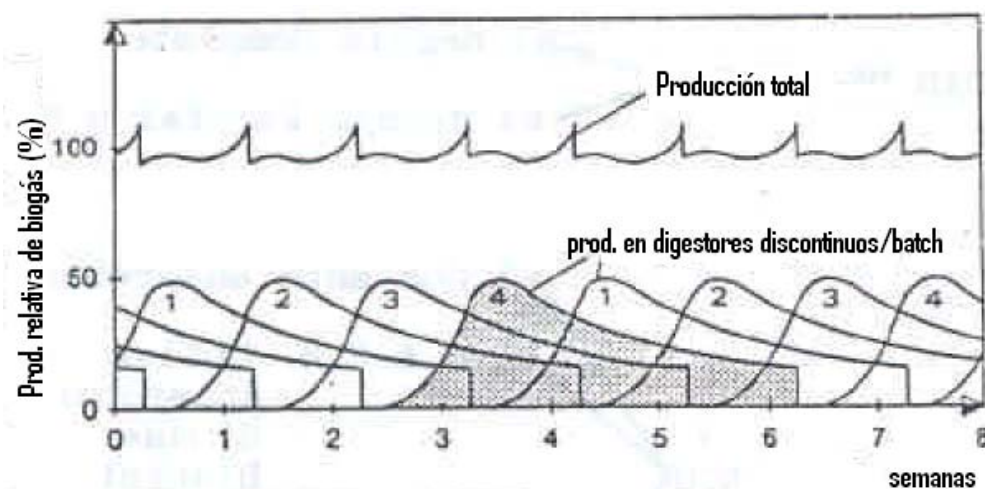
Estudios afirman que cada metro cúbico (1m^3) de materia orgánica produce alrededor de medio metro cúbico de biogás ($0,5\text{m}^3$), y no hay forma de generar más biogás del que ya se generó.

Este sistema es recomendable cuando la materia a procesar esta a disposición de manera intermitente; además la ventaja de este tipo de digestor radica en que sirve para la digestión de materiales celulósicos o con contenidos de lignina que no pueden ser tratados en los digestores de tipo continuo debido al posible taponamiento de los conductos de alimentación y salida. Como adición a esta ventaja, podemos decir que también acepta el trabajar con alimentaciones de

altos contenidos sólidos, reduciendo así la necesidad de utilizar agua para mezclar la biomasa.

Para poder explotar la producción se usa una línea de digestores de modo que se cargan a diferentes tiempos para que la producción de Biogás en términos generales permanezca constante (figura 17).

Figura 17. Producción relativa del biogás conforme pasa el tiempo



Fuente: Instituto de Ingeniería rural. I.N.T.A. – Castelar

También es ideal este modelo a nivel de laboratorio, cuando se quieran analizar o evaluar los parámetros del proceso o comportamiento de un residuo orgánico o una mezcla de ellas. Como nota adicional, estos tipos de digestores son generalmente utilizados en Guatemala.

5.1.2. Digestores de tipo continuo

Este tipo de digestores consiste en, una vez alimentado con la primera carga, se mantenga la alimentación regularmente. La biomasa a utilizar tiene que estar mezclada con agua, esta mezcla debe producirse fuera del digestor, antes de la alimentación.

Este tipo de digestor necesita de un elemento a la salida del mismo, para que en ella se puedan acumular los purines ya digeridos, que en realidad serán los lodos enriquecidos con elementos fertilizantes.

Una vez que el proceso de digestión se ha estabilizado, la tasa de producción es bastante constante (hay que mantener la velocidad de alimentación así como la temperatura). Hay que tener cuidado de que la entrada y salida de las tuberías no esté bloqueadas como consecuencia de la digestión.

Este tipo de digestores se desarrollan principalmente para tratamiento de aguas residuales, es decir es de aplicación industrial. En general son plantas muy grandes, por el cual se emplean equipos comerciales para alimentarlos, proporcionarles calefacción y agitación, así como para su control.

5.1.3. Digestores de tipo semicontinuo

Es una combinación de las bondades tanto del tipo de digestor discontinuo o tipo batch con el continuo. En este tipo de digestor, el volumen que ingresa desplaza una cantidad equivalente de efluente que se evacua por la salida. Como consecuencia el volumen del sustatruo que alimenta el digestor permanece constante. La carga generalmente es en forma diaria, pero la descarga total a diferencia del tipo Batch sólo será una o dos veces al año, que generalmente coincide con el periodo de siembra para poder aprovechar el poder fertilizante de los residuos de la digestión y de los lodos fermentados, parte de éstos lodos es vuelto a utilizar como alimentación del digestor.

El tiempo de permanencia de la biomasa o el TRH (tiempo de retención hidráulica) lo hemos mencionado en apartados anteriores, siendo su valor aproximado:

$$TR = \frac{vol}{vd} \quad [dias]$$

TR: tiempo de retención hidráulica

vol: Volumen del digestor

vd. Volumen de carga diaria

Este valor no es exacto debido a que parte del material introducido puede salir en un periodo más corto.

Este tipo de digestor es el más difundido a nivel mundial, y dentro de ellas existen pequeñas variaciones, pero todas parten del mismo principio. Por ello, es el tipo más usado en el medio rural, cuando se trata de digestores pequeños o para uso doméstico. Los diseños más representativos son el hindú y tipo chino.

5.2. Tipo de digestores de acuerdo a su funcionamiento

5.2.1. Digestor tipo hindú o de domo flotante

Este sistema se desarrolló en la India, después de la segunda guerra mundial, más o menos por los años 50, la necesidad de los campesinos por combustibles fósiles para los tractores y calefacción para sus hogares en temporadas de invierno, los llevó a desarrollar este tipo de digestor. Sin embargo cuando la situación mundial mejoró, y se podía conseguir los combustibles fósiles, el uso de los digestores se dejó y volvieron a los hidrocarburos.

De todas maneras, como India es pobre en combustibles, se organizó el proyecto KVIC (Khadi and Village Industries Commission) y como resultado salió el digestor hindú.

Este tipo de digestor trabaja a presión constante y es muy fácil su operación, ya que fue ideado para ser manejado por campesinos con muy poca formación en este aspecto. Entre los tipos de digestor hindú existen varios diseños pero el más conocido o utilizados son los verticales y enterrados. Y la alimentación es de tipo Batch.

El digestor se alimenta una vez al día, con un volumen de mezcla que depende del tiempo de fermentación o retención y producen una cantidad diaria más o menos constante de biogás si se mantiene a condiciones óptimas de operación.

El digestor indio esta provisto de un tambor, originalmente hecho de acero, material que causaba muchos problemas debido a la corrosión, pero gracias al desarrollo de los materiales, hoy en día se hace de vidrio reforzado en plástico (FRP). Normalmente la pared del reactor y fondo es de ladrillo aunque muchas veces se utiliza sólo hormigón. El gas es recaudado en la parte superior, dando la impresión que está entrampado bajo una tapa flotante que sube y cae en una guía central, dependiendo de la producción de biogás. Sube a medida que aumenta la producción del biogás, y baja al consumirse (por ejemplo para el uso en una cocina) el gas. Al descender el pistón por la guía, parte de los residuos digeridos se desplazará por el caño de salida para luego situarse en el depósito de lodos o fertilizantes. El vaciado completo sólo se realiza en el caso de requerir alguna reparación o limpieza.

La temperatura de trabajo a la que está sometido este diseño para su funcionamiento varía entre 30-40°C, temperatura acorde a las bacterias metanógenos. Mientras que para digestores expuestos en climas fríos es preferible trabajar entre 50-60°C.

La presión del gas a la que está expuesta se podría considerar constante varía entre 4- 8 cm de presión de agua (1 metro de agua = 0,09670 atmósferas) cantidades que son bajas si comparamos con las del modelo Chino. El reactor se alimenta de manera semicontinua a través de una tubería de entrada.

Ventajas

- Presión de trabajo es constante
- Se puede determinar la cantidad de gas almacenado por el nivel de la campana
- Este modelo es de fácil operación, destinado para que sea manejado por campesinos de poca preparación.
- Como consecuencia del punto anterior pocos errores en la construcción.

Desventajas

- De utilizarse un tambor de acero, alto costo de la construcción
- La corrosión derivada de utilizar el acero podría disminuir el tiempo de vida del digestor (hasta de 15 años en países tropicales)
- Como consecuencia del punto anterior, significativos costes de mantenimiento debido a la pintura recubridora.
- De utilizarse tambores FRP, el coste aumenta ya que el tambor es más caro, pero no necesita mucho mantenimiento.

Como implicación sociológica se puede acotar que el biogás en la India es llamada “Gobar Gas”, Gobar es el significado de estiércol de la vaca. La vaca es un animal sagrado en la India, por lo tanto el Gobar es un recurso aceptable como combustible para cocina; sin embargo en algunas comunidades no son permitidos los residuos humanos o de cerdo para dicho propósito, aún así los resultados del biogas en composición sean los mismos.

Variantes de digestor tipo hindú:

Figura 18. Digestor tipo hindú con pistón de carga en la parte superior

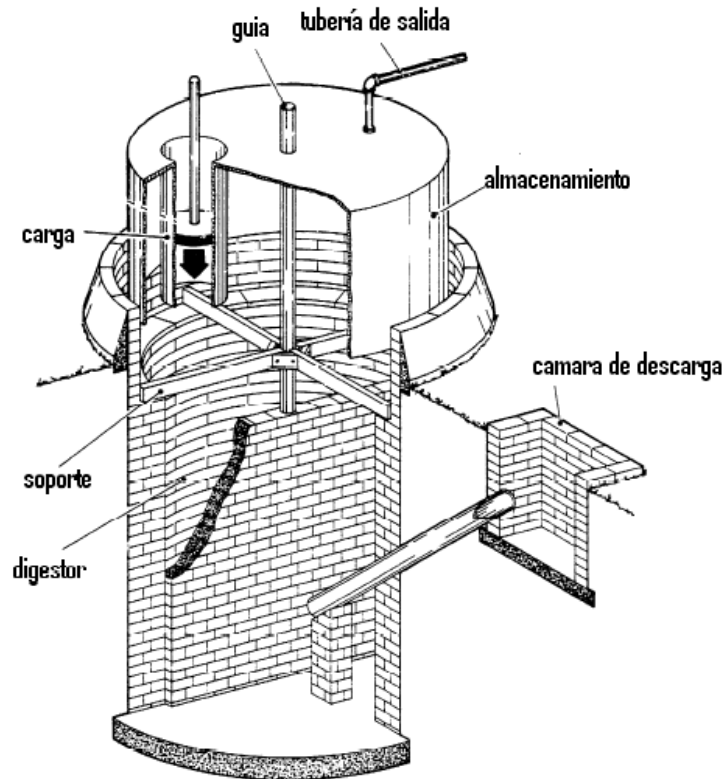
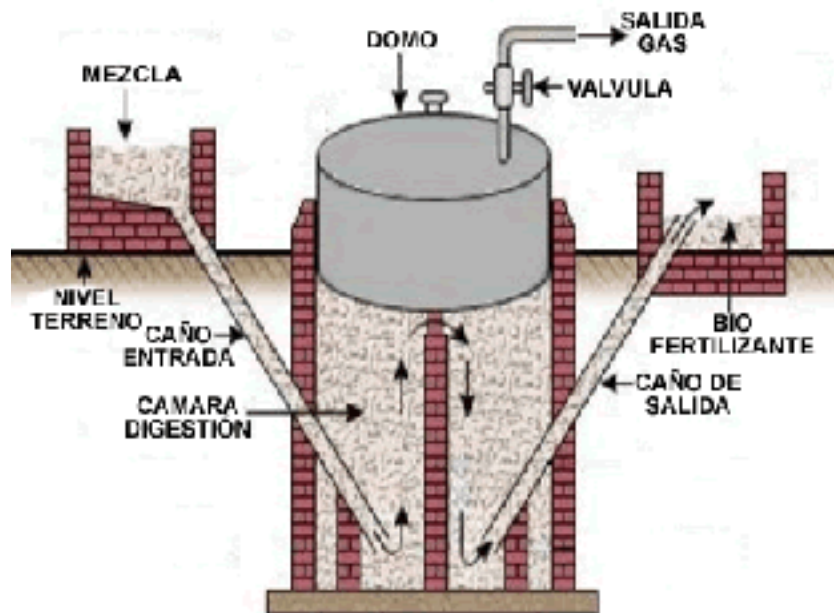


Figura 19. Digestor tipo hindú con tuberías de transporte



Otra variante del digestor tipo hindú que ha logrado disminuir los costes hasta un 30% es la que se caracteriza por tener una estructura semiesférica de polietileno de película delgada en sustitución de la campana móvil, y un tanque de almacenamiento de piedra y ladrillo como los empleados en los prototipos tradicionales. La ventaja de este tipo derivado es que resulta más económico que los sistemas tradicionales, por ejemplo una instalación de 4 m³ puede costar aproximadamente unos \$500 USD, y la estructura de polietileno flexible puede llegar a alcanzar hasta diez años de vida.

Foto 1. Digestor media cúpula flexible



5.2.2. Digestor tipo Chino o de cúpula fija

Mientras que en la India el objetivo de diseño del digestor estaba fundamentado en el reemplazo del combustible tipo fósil; en China los objetivos era específicamente sanitario y alimenticio. Los digestores tipo chino o de cúpula fija, fueron diseñados como consecuencia de una mejora de los digestores de tipo indio. Siendo ampliamente difundidos en los años 50 y 60.

Antiguamente los chinos utilizaban las excretas humanas y de animales como fuente para el bono agrícola, provocando problemas sanitarios y de contaminación ambiental del sector rural. Con la utilización de los digestores, los problemas de malos olores se eliminaron, y se trataron las excretas de manera anaerobia, enriqueciendo así los lodos resultantes para utilizarlos como fertilizantes, eliminando así los problemas sanitarios.

El digestor unifamiliar de tipo chino opera básicamente con presión variable debido a su estructura que es estática. Hay que recordar que su objetivo no fue el Gas, sino el abono orgánico procesado y recuperado.

Uno de los problemas más trascendentales que limita la expansión de la implantación de éste modelo, es que necesitaba de técnicos especialistas para la construcción de la misma. Además, en casi todos los lugares en que estos sistemas han sido implantados o introducidos, han sido subsidiados por los gobiernos o por organismos de ayuda.

El incentivo de utilización de este tipo de sistema a nivel de comuna estaba basado en pagos o puntos extras a los campesinos por el uso de la misma. Así el campesino que utilizaba fertilizantes provenientes de restos humanos y animales conseguía más puntos que aquellos que sólo utilizaban los provenientes de animales; dando lo mismo si el agricultor es hombre o mujer.

El digestor está construido por ladrillos, piedra y hormigón; la superficie interior es cubierta por una capa delgada de mortero o cemento para hacerlo firme. El gas producido es guardado o almacenado en la cúpula, como la cúpula es fija, los volúmenes del efluente varía debido a la presión variable desarrollada por la producción de metano con valores alrededor de 1 y 1,5 m de agua (1 metro de agua = 0,09670 atmósferas). Esto crea fuerzas estructurales bastante altas y es la

razón por la que se eligió su forma de cúpula o semi hemisférica en la cima y el fondo. Además cuenta con una cavidad de desplazamiento de los residuos que termina en la cámara de efluentes, en el cual albergará los lodos que se utilizarán como fertilizantes. Como se dijo anteriormente, la producción de gas aumenta la presión en el digestor y esto ocasiona que se produzca un empuje en los residuos desplazándolos por la cavidad de desplazamiento. Cuando el gas es extraído, una cantidad proporcional de residuos es llevada de la entrada al digestor.

La formación de las personas que construirán el digestor además de los materiales de construcción así como las personas que lo utilizarán es de alta calidad, por lo tanto los costes derivados de esta construcción es bastante alta.

En este diseño se elimina la utilización del tambor (sea de acero o de FRP), y como consecuencia posible problemas de corrosión en el caso de utilizar tambor de acero.

Este tipo de digestores se cargan en forma semicontinua, se requiere que la primera carga contenga material celulósico y estiércol y de inoculantes, hasta un 70% de la capacidad luego se sigue cargando como un digestor continuo; luego, a los 120 a 180 días se descarga en forma total y se reinicia el ciclo. Generalmente se maneja estos digestores en forma continua.

Ventaja

Vida útil prolongada, pueden llegar como promedio a 20 años siempre y cuando se realice un mantenimiento sistemático, lo cual es mayor comparado con los digestores tipo hindú.

Desventaja

Tiene una baja capacidad de almacenamiento y requiere de un buen sellado (cierre hermético) para prevenir escapes de gas

Variantes de digestores tipo chino.

Figura 20. Variante de digestor tipo chino

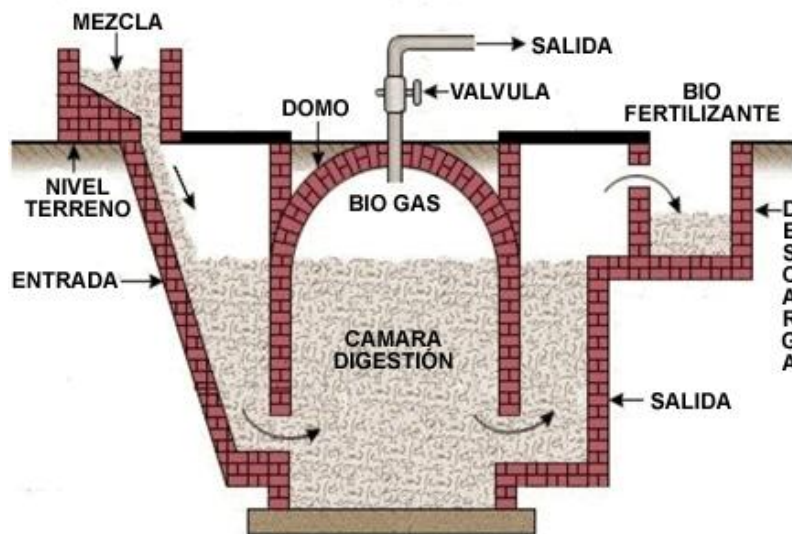
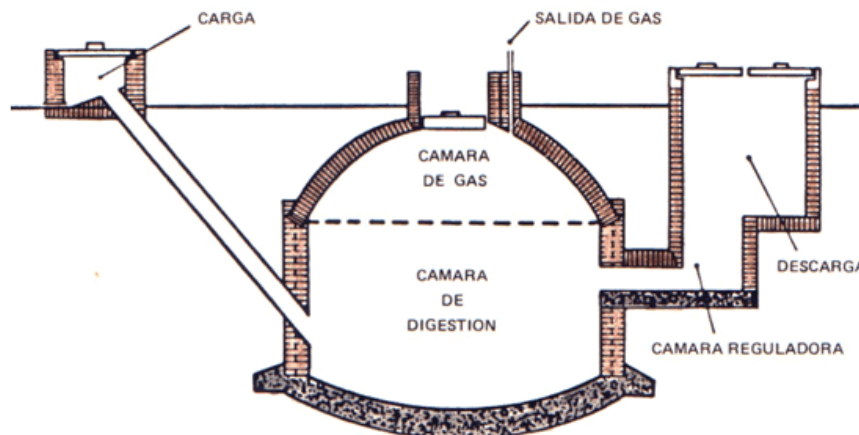


Figura 21. Variante de digestor tipo chino



5.2.3. Digestor tipo bolsa completa

Este es el diseño de digestor que he escogido en este trabajo para desarrollar, debido al alcance tecnológico como económico así como el impacto que ofrece su uso en una comunidad andina. El limitante

económico motivó a ingenieros taiwaneses a investigar para realizar digestores hechos con materiales flexibles (FAO, 1992), que suponen un costo menor. Inicialmente se utilizó el nylon y neopreno, pero los resultados fueron negativos puesto que resultaron ser muy costosos. A través de los años los materiales se han desarrollado y hoy en día las comunidades que usan este tipo de digestor lo hacen con polietileno.

El digestor de bolsa completa es recomendado para comunidades que están limitadas económicamente debido a su bajo coste de instalación (puesto que los materiales de construcción pueden ser adquiridos en la mayoría de ciudades de los países en vías de desarrollo), y que requiera producciones o explotaciones menores, que cuenten con 6 a 25 vacas o 15 a 50 cerdos. Este tipo de digestor además se presta para aquellas zonas rurales accidentadas, es por ello que están al alcance de una mayor cantidad de personas (se estima, por ejemplo, que en la actualidad hay más de 30000 usuarios de esta tecnología en Vietnam).

Este digestor consiste en un modelo de bolsa completa de polietileno (plástico) muy resistente (foto 2), siendo la variante aquella con media bolsa y base de concreto.

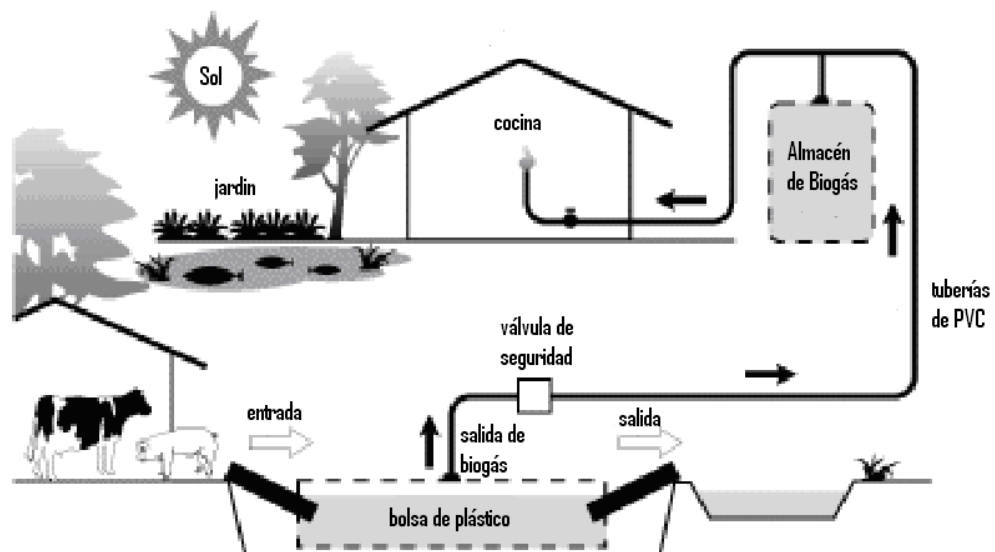
La bolsa es representa la cámara de digestión donde la biomasa se fermenta y se va inflando con una presión baja a medida que se produce el biogas, y cuenta con otra bolsa en la parte superior para el almacenamiento del biogas producido que será llevado por las tuberías a los objetos de uso final como cocinas, lámparas, motores, etc. Se tiene un dispositivo para la entrada de la biomasa y otra para la salida de los fertilizantes, la distribución de las partes se presenta en la figura 22.

Foto 2. Digestor de bolsa completa



Es recomendable que la instalación del digestor se haga lo más cerca posible del lugar donde esta ubicada la zona de recaudación de desechos animales o humanos.

Figura 22. Digestor tipo bolsa



Fuente: FAO Corporate document repository.

La bolsa – digestor puede colocarse directamente sobre el suelo o sobre una estructura de madera, en esta situación hay que tener sumo cuidado en no pinchar el digestor con astillas. Si la región es muy fría y el terreno lo permite, debe excavarse una especie de fosa con un 4% de desnivel y cubrirse con piedras y cemento y encima poner el digestor. Luego se construyen las piletas de entrada y de salida y se acoplan las tuberías, incluyendo la de salida del gas.

En regiones muy frías, en zonas con temperaturas menores o iguales a 10 °C, es importante proteger el digestor contra las inclemencias del tiempo. Para ello se construye una especie de invernadero de material plástico o de madera (foto 3).

Foto 3. Protector para el digestor.



En cuanto al funcionamiento podemos decir que la producción de gas comienza dos o tres semanas después de haber iniciado el proceso de carga y entre la cuarta y quinta semana el biogás se torna en combustible.

Se sugiere que la mezcla esté exenta de natas, algunas veces se produce la mezcla de los purines dentro de los digestores, entonces para evitar las formaciones de nata es recomendable que el digestor cuente con un paleta de metal que agite la mezcla, se introduce por las piletas de entrada y de salida y a la que se aplica movimientos de arriba hacia abajo.

La mayoría de los digestores de este tipo se construyen en tres tamaños, que permiten almacenar 5, 10 y 15 m³ de biogás.

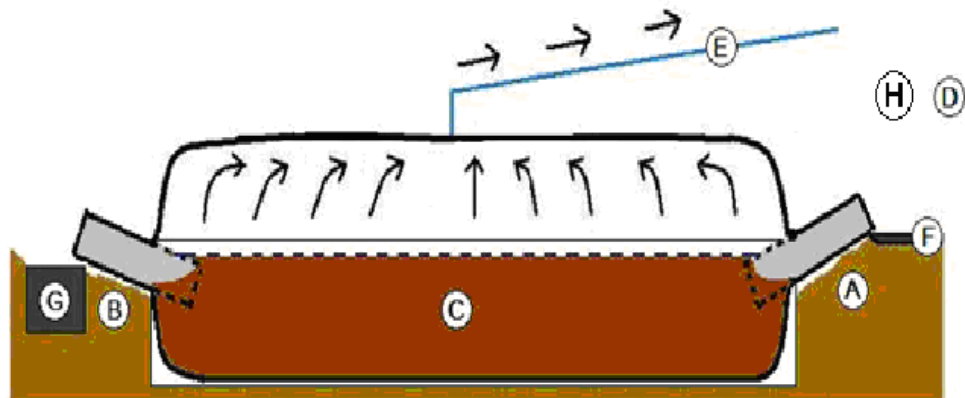
Ventajas: Además de las ventajas relacionadas con el medio ambiente que implica la utilización de los digestores anaerobios, podemos añadir las siguientes

- Definitivamente la primera ventaja radica en el coste de implantación del sistema.
- Fácil implantación del sistema
- Fácil mantenimiento del sistema
- Trabajos a muy bajas presiones
- Los diseños pueden personalizarse de acuerdo al consumo

5.2.3.1. Partes del digestor tipo bolsa completa

A continuación presentaremos las partes que conforman este tipo de digestor en la figura 23.

Figura 23. Ubicación de las partes de un digestor tipo bolsa



Fuente: CEDECAP

5.2.3.1.1. Tubo de entrada (A)

Es el ducto de plástico con un diámetro de 20 a 30 cm por el que entra la biomasa combinada con agua, es decir de los purines, se recomienda que esté sumergida en los residuos al menos a 15 cm de profundidad a fin de evitar escapes de metano, además hay que evitar en todos los casos la obstrucción de dicho tubo.

5.2.3.1.2.Tubo de salida (B)

La posición del tubo de salida esta por debajo del nivel del tubo de entrada, pero en el lado opuesto del digestor, tiene un diámetro aproximadamente de 10 a 15 cm. Al igual que el tubo de entrada, debe estar sumergido a 15 cm de profundidad del fermentador para prevenir escapes de biogas y hay que tratar que el flujo de salida sea constante.

5.2.3.1.3.Bolsa de digestión o fermentador (C)

La bolsa es el lugar donde los purines se fermentarán, su tamaño depende de la cantidad de purines ingresados en el digestor y del biogás a producir. Si las necesidades de biogás son elevadas, se recomienda conectar varios digestores conectados por tubos de plásticos, pero el limitante será económico. Como vimos en los procesos microbiológicos, es recomendable que el proceso se produzca a una constante temperatura y a un determinado valor (aprox. 35°C), para ello es deseable que el digestor sea cubierto y así se mantenga aislado, un buen mecanismo para lograr esto sería de construir una pared de tierra en la parte norte (donde se alimenta el digestor) del digestor para prevenir el enfriamiento causado por los vientos

5.2.3.1.4.Bolsa de almacenamiento (D)

La bolsa de almacenamiento del biogas producido se localizará en la parte superior del sistema o estar de manera independiente cerca del objeto de uso final como por ejemplo una cocina.

5.2.3.1.5.Tubo de transporte de metano (E)

Ubicado en la bolsa de almacenamiento, destinado para transportar el biogás desde ese punto hasta el lugar de uso, el tubo posee una

salida que esta sumergida en agua y que drena la humedad condensada.

5.2.3.1.6. Recipiente de entrada para la carga (F)

Recipiente en el que se mezclará la biomasa con agua para convertirla en purines. Generalmente se instala a la entrada del digestor, es recomendable que esté lo más cerca posible para poder garantizar la temperatura de la biomasa al inicio del proceso.

5.2.3.1.7. Recipiente de recolección de lodos (G)

Recipiente donde se recogen los lodos después de haber sido digeridos en la bolsa, se encuentra en el extremo opuesto al de la entrada, en él se deben contener los fertilizantes, pero además hay que recogerlos a medida que se alimenta el digestor.

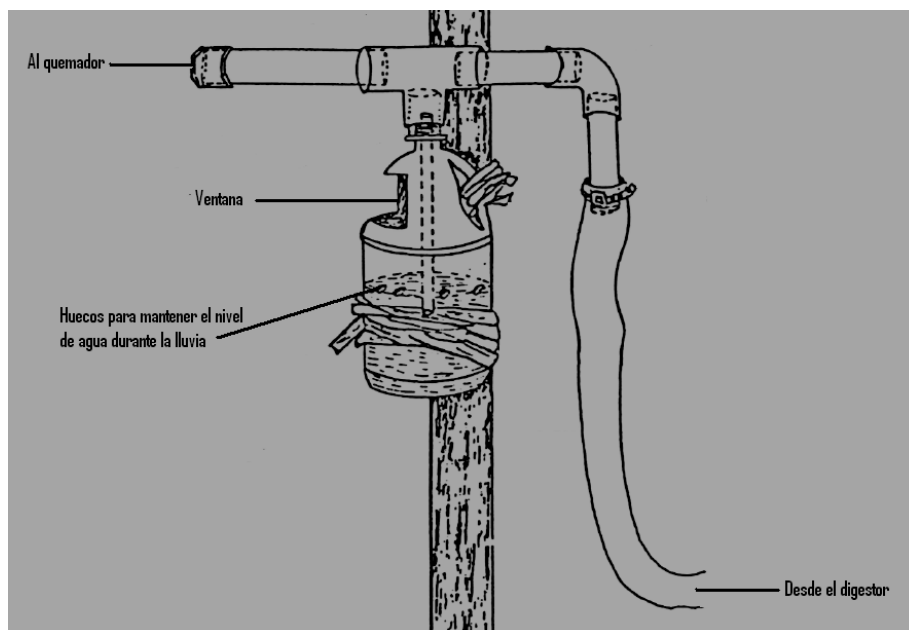
5.2.3.1.8. Válvula o dispositivo de seguridad (H)

Previene la ruptura del digestor debido al aumento de la presión originado por la fermentación anaeróbica de la biomasa. Consiste en una botella de plástico de cómo mínimo 10 cm de profundidad insertada al tubo de salida, se activa cuando la presión del digestor es mayor a la del agua liberando el biogás (figura 24).

La válvula de seguridad tiene que ubicarse cerca del digestor en la conducción de gas que sale de este, tiene la función de formar un sello de agua que permita la salida del biogás en condiciones normales, pero que a su vez deje escapar el exceso de presión evitando la ruptura de plástico o la bolsa.

La confección de la válvula de seguridad podemos encontrarlo dentro del presente trabajo en los anexos 9.1.

Figura 24. Gráfico de la válvula a instalar en el digestor



Fuente: Botero R y Preston TR 1987.

5.2.3.1.9.Tubo de limpieza

El tubo de limpieza es un complemento no indispensable, se implementa dependiendo la decisión de la comunidad que piense optarlo. El lodo que se sedimenta en el fondo del digestor debe ser removido cada dos años, la tubería sirve para evacuar estos lodos por mecanismos como bombeo, se pueden disponer cuando el digestor es muy largo de un tubo en un extremo del digestor y otro en la mitad del mismo.

5.2.3.2.Instalación del digestor de bolsa

5.2.3.2.1.Ubicación del digestor

Es preferible que este lo más cerca posible del lugar donde se tienen a los animales, ya que teniendo en cuenta el transporte de las excretas, es más fácil transportar el biogás producido que la materia prima que en este caso son las excretas de los animales, además, las excretas tienen que estar mezcladas con agua para convertirse así en purines; por lo tanto, sería conveniente que las

excretas sean escurridas con agua y luego por gravedad hacer que fluyan directamente hasta la entrada del digestor (foto 4).

Foto 4. Ubicación del digestor.



5.2.3.2.2.Preparando el lugar

Una vez que se tengan las dimensiones del digestor y que se haya localizado la futura ubicación, se procede a cavar una zanja donde se colocará el digestor. Se sabe que en promedio el 80% de la capacidad total del tubo será ocupado por el estiércol líquido, así que para procesar por ejemplo un volumen líquido de 4 m^3 se necesitará un digestor de 10 m de largo. Por lo tanto las dimensiones de la zanja serían:

- 90 cm de ancho para la parte frontal
- 90 cm de profundidad en toda su longitud
- 70 cm de ancho para la parte posterior
- 10 m de largo

Es importante dejar lisas las paredes de la zanja, como podemos apreciar en la foto 5, ya que cualquier elemento astilloso puede dañar el plástico del digestor rompiéndolo, y por lo tanto dejando

que el biogás producido se escape, por lo tanto sería preferible que se cubra las paredes de la zanja con un plástico. El suelo deberá tener una ligera pendiente para permitir el flujo continuo de purines, a lo largo del digestor. La tierra que se saca de la zanja deberá ser llevada lejos de los bordes, para así evitar que caigan sobre el plástico a causa de movimientos alrededor del digestor o por las lluvias

Foto 5. Cubriendo las paredes para no dañar el digestor



5.2.3.2.3.Preparando el digestor

A los 10m de longitud del plástico hay que aumentar 75 cm a cada lado del digestor para que pueda tener holgura a la hora de envolverlos al rededor de las tuberías de entrada y de salida, por lo tanto la dimensión final que se necesitará será 11,5 m. La cámara de digestión o de fermentación esta hecha por dos capas de plástico para poder hacerlo resistente. Cuando la segunda capa (bolsa) de plástico sea insertado dentro del primero, se debe tener cuidado que los dos encajen de manera ajustada, sin dobleces ni arrugas (foto 6).

Foto 6. Preparando la bolsa



Fuente: CEDECAP

5.2.3.2.4. Instalando la tubería de entrada y de salida

Debido a la sensibilidad del plástico, es recomendable forrar internamente los tubos de 1 ó 1,20m de largo con un jebe de 3 ó 4cm de espesor, para así evitar astillas producidas posiblemente al cortar los tubos y que rompan el plástico del digestor. Se introduce más o menos 50cm dentro del digestor, lo restante se deja expuesto en el exterior. Hay que sujetarlo fijamente en el digestor mediante una cinta de jebe, sin dejar hendiduras a fin de evitar el ingreso de oxígeno (foto 7 y foto 8).

Foto 7. Recubrimiento de los tubos con jebe



Fuente: CEDECAP

Foto 8. Instalación del tubo de entrada y salida del digestor



Fuente: CEDECAP

Una vez instalado el tubo de entrada en el digestor, hay que colocarlo en la zanja previamente hecha, se recomienda que el ángulo de inclinación por la que descansa los tubos oscile entre 30° y 45° , teniendo siempre cuidado de colocarlos de tal forma que al llenar el digestor con la mezcla (purines), buena parte del tubo quede cubierta y se cree un sello que no permita el paso de oxígeno. Luego hay que fijar la posición para mantener esa posición como vemos en la foto 9.

Foto 9. Fijando la posición del tubo

***Llenando la manga de polietileno con aire:***

Se cierra uno de los extremos del digestor así como el escape de gas, para que por el extremo abierto se pueda proceder a llenar la bolsa con aire, la bolsa debe estar echada en el suelo liso para evitar daños en el plástico. Como se dijo desde el extremo abierto se fuerza el aire hacia el interior de la manga en forma de olas creadas al agitar el extremo de la manga con un movimiento

propulsor de los brazos hacia adelante. A 3 metros del extremo posterior se ata el digestor para evitar que se escape el aire que lleva dentro y así colocar la tubería de salida, la instalación es la misma que la tubería de entrada.

Una vez terminada la colocación de los tubos de entrada como de salida de la alimentación como el tubo de salida de gas y de llenar ligeramente de aire al digestor, se coloca en la zanja como vemos en la foto 10.

En el anexo 9.2 se presenta la confección del sello que conecta las capas del digestor con el tubo de transporte de biogás.

Foto 10. Digestor colocado



Fuente: Indígenas sin fronteras

Y luego se complementa con la bolsa de almacenamiento del biogás producido, que estará ubicado lo más cerca posible de los dispositivos de uso del biogás, como son las cocinas por ejemplo.

Foto 11. Vista del almacén de biogás



Fuente: Indígenas sin fronteras

Foto 12. Vista de almacén de biogás



Como se dijo anteriormente es preferible que se cubra al digestor con una estructura protectora para evitar que el digestor se deteriore por recibir directamente los rayos del sol o para que los animales no lo dañen, (foto 13). En épocas de lluvias hay que tapar los tubos de entrada y de salida del digestor para que no entre agua, así como hay que evadir el paso de piedras o pasto al digestor.

Foto 13. Protección para el digestor



Fuente: CEDECAP

5.2.3.3. Mantenimiento del digestor y preguntas frecuentes

En el caso de presentarse rupturas pequeñas, mientras el polietileno no esté degradándose, se puede proceder a sellar los huecos con trozos de neumático que se fijan a la superficie de la bolsa con ayuda de un pegamento. Se debe realizar una revisión periódica de los conductos y sus uniones con el fin de evitar posibles fugas de biogás, puesto que es un combustible explosivo y de olor fuerte al igual que el gas propano, por lo que debe evitarse su utilización descuidada en recintos cerrados.

Generalmente, dentro del digestor, los purines tienden a formar una “nata” flotante constituida por el material fibroso no digerido por las bacterias, esta nata se deshace desde el exterior al hacer presión a todo lo largo de la superficie del digestor, de esta manera salen expulsadas por el tubo de salida.

Hay que evitar utilizar materiales metálicos (de por sí se recomienda utilizar materiales sintéticos), de tal manera se evita que se produzca corrosión del biogás sobre dichos metales.

Con respecto a la válvula de seguridad, es necesario que se lave o limpie cada vez que sea necesario, ya que al estar expuesta al medio ambiente y por contener agua en su interior, la válvula se llena de algas y podría obstruir la salida del biogás que es producido en exceso.

Preguntas frecuentes

- *No hay suficientes animales para que produzcan estiércol necesario*
Esto genera un problema, que podría ser aliviado con la conexión de las letrinas usadas por las familias con el digestor, además también es posible añadir materiales de fácil degradación con los rastrojos de yuca, melaza o cualquier fuente similar de carbohidratos.

- *Hay olor a gas*

Puede ser causado por una conexión suelta, una tubería dañada en la cocina o un agujero en el digestor, para todos esos casos es posible arreglarlos con esparadrapo o cinta adhesiva, y con respecto al digestor con parches de neumático, como ya se sugirió en el punto del mantenimiento.

- *No se produce suficiente gas*

La mayoría de las veces se debe al mal estado de las tuberías, ya sea por que esté rota o doblada, impidiendo así que fluya el gas; hay que ubicar el trozo con desperfecto y reemplazarla por otro trozo nuevo.

- *No hay suficiente agua en la válvula de seguridad*

Hay que revisar constantemente la evaporación del agua en la botella, para que no caiga por debajo del nivel del extremo del tubo T de gas.

- *Se cocina muy lento*

Se necesita presión en el aparato de almacén de biogás, y si el digestor cuenta con una faja puesta alrededor, también habría que ajustarla.

- *Hay muy poco biogás en el almacén por las mañanas*

Puede ser debido al olvido de desajustar la faja del digestor la noche anterior. Es preferible ubicar el almacén en un lugar cercano a la cocina para que sea más fácil controlarlo.

- *El digestor tiene un agujero que atraviesa las dos capas.*

Si el agujero es grande, es mejor reemplazar las dos bolsas por otras nuevas, también se recomienda cubrir el digestor con un cerco para evitar su deterioramiento.

- *La primera capa del digestor esta rota*

Muchas veces la capa exterior se deteriora más rápido, debido a que al estar expuesta al sol se vuelve más frágil y aumenta las posibilidades de romperse, por eso algunas veces hay que regarle con agua

- *Hay mucha tierra de la zanja dentro del digestor*

Considerado como problema serio. Puede ser porque la ubicación es en un lugar muy arenoso o en zonas bajas donde la lluvia arrastra mucha tierra de la pendiente a la zanja. Para evitarlo, hay que elegir cuidadosamente otra ubicación del digestor, se pueden construir canales por donde pueda acumularse y fluir o deslizarse fácilmente la lluvia. Se puede construir un muro frente a la entrada del digestor.

- *El purín dentro del digestor es muy duro*

Implica que las bolsas estarán sujetas a un fácil deterioro, por ello se recomienda cambiarlas cada 2 años.

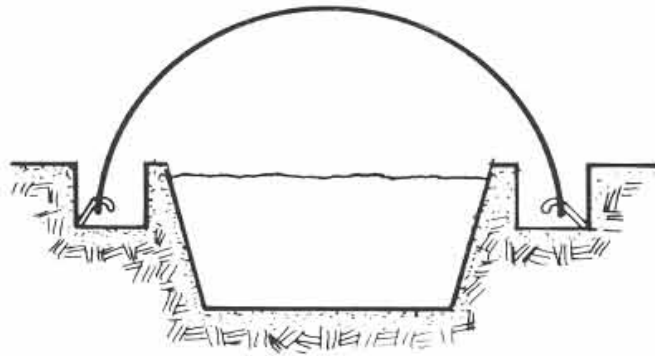
5.2.3.4.Digestor de media bolsa

El tipo de digestor de media bolsa o tipo PVC con canal de agua, se puede construir de cualquier tamaño, pero es recomendable para grandes explotaciones, es decir para lugares que cuenten con más de 500 kg de estiércol fresco.

Primero se hace una base de concreto, de cemento y ladrillos, es decir material noble que se encuentre en la comunidad; mientras que en la parte superior como media bolsa se utiliza un cobertor de plástico que se fija al digestor por medio de ganchos y se cierra herméticamente utilizando un sello de agua, figura 25. Como el modelo de bolsa completa, el digestor debe tener un recipiente para la entrada de biomasa y otro de salida para la salida de los lodos fertilizantes, así

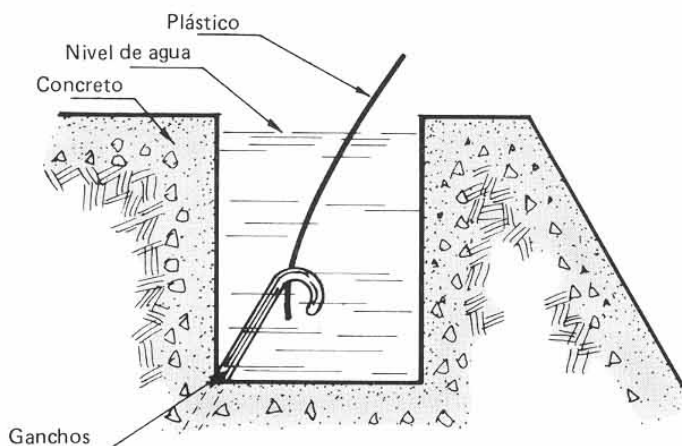
como las tuberías correspondientes para el transporte del biogás producido hacia los objetos de uso final.

Figura 25. Digestor de media bolsa



Fuente: Soluciones prácticas

Figura 26. Gancho que sujeta al digestor



Fuente: Soluciones prácticas

De manera similar al digestor de bolsa completa, el digestor de media bolsa debe estar cerca del establo donde se encuentran los animales y debe tener un desnivel del 4% para facilitar la eliminación del material procesado y de algún objeto extraño que se haya mezclado con la materia prima, un ejemplo de este tipo de digestor podemos apreciar en la foto 13.

Foto 13. Instalación del digestor de media bolsa.



De acuerdo a estudios realizados en Costa Rica, los investigadores recomiendan como se dijo anteriormente el uso de digestor de bolsa completa para comunidades que cuentan con menos de 25 animales, mientras que para comunidades que cuentan con más de 25 animales es preferible el uso de digestores de media bolsa. La producción de biogás producido en las experiencias estudiadas es presentada en las siguientes tablas 20 y 21:

Tabla 20. Tamaño recomendable del digestor de acuerdo a la cantidad de cerdos

Nro de cerdos	Tamaño en m ³ del digestor	Producción en biogás m ³
15-25	5-10	2,70 a 4,50
25-40	10-15	4,50 a 7,30
40-85	15-30	7,30 a 15,00
85-200	30-50	15,00 a 36,00

Fuente: Soluciones Prácticas

Tabla 21. Tamaño recomendable del digestor de acuerdo a la cantidad de vacas

Nro de vacas	Tamaño en m ³ del digestor	Producción en biogás m ³
6-12	5-10	2,22 a 4,44
12-22	10-15	4,44 a 8,14
22-40	15-30	8,14 a 14,80
40-75	30-50	14,80 a 22,75
75-150	50-100	22,75 a 55,50

Fuente: Soluciones Prácticas

6. Modelización y diseño de un digestor anaerobio

Son muchos los factores que influyen en la selección de un determinado diseño o modelo de una planta de biogás, entre los principales factores tenemos los siguientes:

- Económicos (u.m/m³ de biogas u.m: unidades monetarias)
- Simplicidad en el diseño (no sólo para la construcción sino también para el mantenimiento, además, hay que tener especial consideración con aquellos países donde la tasa de alfabetización y la mano de obra cualificada es baja)
- Utilización de materiales locales (ya que se esta tomando en cuenta países donde el sistema de transporte no esta adecuadamente desarrollada)
- Durabilidad (puesto que la reconstrucción de la misma no es rentable, la habilidad necesaria y los materiales no son de fácil acceso)
- Apropiado para el tipo de Insumos (el diseño debe ajustarse a la alimentación si será continua o discontinua)
- Frecuencia de uso de los insumos y productos (La selección de un determinado diseño y tamaño de sus diversos componentes también dependerá de la frecuencia con que el usuario puede alimentar el sistema y utilizar el gas)

6.1. Programas actuales

6.1.1. AgSTAR - FarmWare

El programa AgSTAR es el producto del trabajo conjunto entre diferentes grupos de interés de los Estados Unidos como puede ser el departamento de agricultura, la agencia de protección ambiental con el departamento de energía. El programa promueve el uso del biogás y de los lodos como fertilizantes, ya que hace hincapié en la reducción de las emisiones de metano en el ambiente que ayuda a que se produzca el efecto invernadero y la conversión de desechos de ganado en una fuente de energía.

AgSTAR es considerado un programa de ayuda completamente en inglés, para la toma de decisiones de los productores pecuarios en cuanto a la situación financiera y el desempeño ambiental de estas tecnologías. Dando información acerca de la mejor manera de utilizar el biogás producido, invertir de manera eficiente, costes energéticos, así como da información de modos de financiar los proyectos.

El programa es recomendado para productores comprometidos que cuentan con un notable número de animales (al menos 500 cabezas de ganado vacuno o 2000 cerdos), es decir que pueden explotar grandes cantidades de estiércol (de recogerse al menos el 90% de las excretas de la cantidad de animales que se tiene). Un sistema propiamente dicho de biogás requiere de una inversión financiera y una responsabilidad de manejo o gestión. El sistema debe estar diseñado por un técnico experimentado en la gestión de residuos animales.

Para ayudar al productor, primero se le proporciona un cuestionario en el cual al final, podrá apreciar si efectivamente cuenta con los requerimientos básicos para poder utilizar la producción del biogás como alternativa financiera.

Es imprescindible que un ingeniero cualificado realice un estudio de viabilidad antes de comenzar el diseño de las instalaciones o las actividades de construcción. Es importante tener en cuenta qué tipos de explotaciones agrícolas son los más adecuados para un sistema de producción de biogás. Es decir, el sistema requiere de acopiar diariamente estiércol proveniente de ganado vacuno (contenidos de sólidos totales menores que el 5%), purines (contenidos de sólidos totales de 5-10%), o semi – sólidos (contenidos de sólidos totales de 10-20%) son los mejores candidatos para un sistema de producción de biogás.

El sistema de biogás del que se habla está formado por los siguientes componentes:

- Colección de los desperdicios
- Digestión anaerobia
- Almacenaje de los efluentes
- Manipulación del biogás
- Uso del biogás

Las alternativas de uso de digestor son:

- **Laguna cubierta:** Para la producción de metano, este tipo de sistema requiere climatización, es decir temperaturas cálidas. Sin embargo no es necesario si el objetivo es disminuir el olor de los purines, se utilizan purines con un máximo de 3% de sólidos totales.
- **Digestor de película fija:** Adecuados para lugares con temperaturas cálidas, los purines también deben contener como máximo un 3% de sólidos totales.
- **Digestor de mezcla completa:** aplicables a lugares de diferentes temperaturas, se utilizan purines que contengan un rango de 3-10% de sólidos totales.
- **Plug flow:** Aplicable a lugares de diferentes climas, pero a diferencia de los demás, la alimentación del digestor es básicamente estiércol de vacas y desperdicios de productos lácteos con contenidos de 11-13% de sólidos totales.

Existen dos opciones del uso del biogas resultante:

- Generación de electricidad, el biogás se utiliza como combustible para los motores o turbinas a gas, que convierten el biogás en electricidad para el uso particular o para venta a la red eléctrica
- Uso directo del biogas a nivel local, el biogás puede ser utilizado para alimentar las calderas, calentadores o procesos que requieran calor,

vapor o refrigeración; que se necesita para tener en buenas condiciones el establo donde se encuentran los animales para la industria láctea o porcina, sin embargo generalmente la producción de biogás es mayor que la necesaria para dichos propósitos.

Características apropiadas con que el sistema debe funcionar:

Las cantidades de agua o humedad, climatización, así como concentraciones de los purines deben ser estudiadas con anticipación para poder tener éxito en el diseño del digestor, figura 27.

Figura 27. Clasificación de acuerdo al contenido en ST



Una gestión eficaz requiere lo siguiente

- Soporte técnico, respaldo que necesita el productor ante problemas en la producción.
- Tiempo, el sistema necesita un mínimo de tiempo para la producción
- Habilidades técnicas, para el mantenimiento del sistema
- Predisposición, el productor debe estar involucrado en el sistema.

Utilizando el programa

La información necesaria proporcionada por el usuario que se requiere para la evaluación

- Información general
 - Tipo de granja
 - Localización

- Configuración de la granja
 - Zonas de confinamiento de los animales
 - Proceso diario de utilización de agua
 - Gestión de residuos y purines
 - Descripción de residuos sólidos

- Ganado
 - Edad y cantidad de animales
 - Tiempo de dedicación de cada punto establecido en la configuración de la granja

- Consumo de energía
 - Tipo de disposición eléctrica (alquilada, propia)
 - Histórico del uso y costes de energía

- Costes e ingresos
 - Otras fuentes de ingresos

Además de los datos introducidos anteriormente por el usuario hay que introducir otros datos referidos al proceso financiero, AgSTAR proporciona valores por defecto para complementar los demás datos necesarios para el análisis. Cabe resaltar que el usuario puede modificar los valores.

- Factores financieros
 - Ciclo de vida del proyecto
 - Porcentaje de pago de entrada
 - Tasa de interés de préstamo
 - Duración del préstamo
 - Tasa de impuesto marginal
 - Tipo de depreciación
 - Tasa de inflación anual

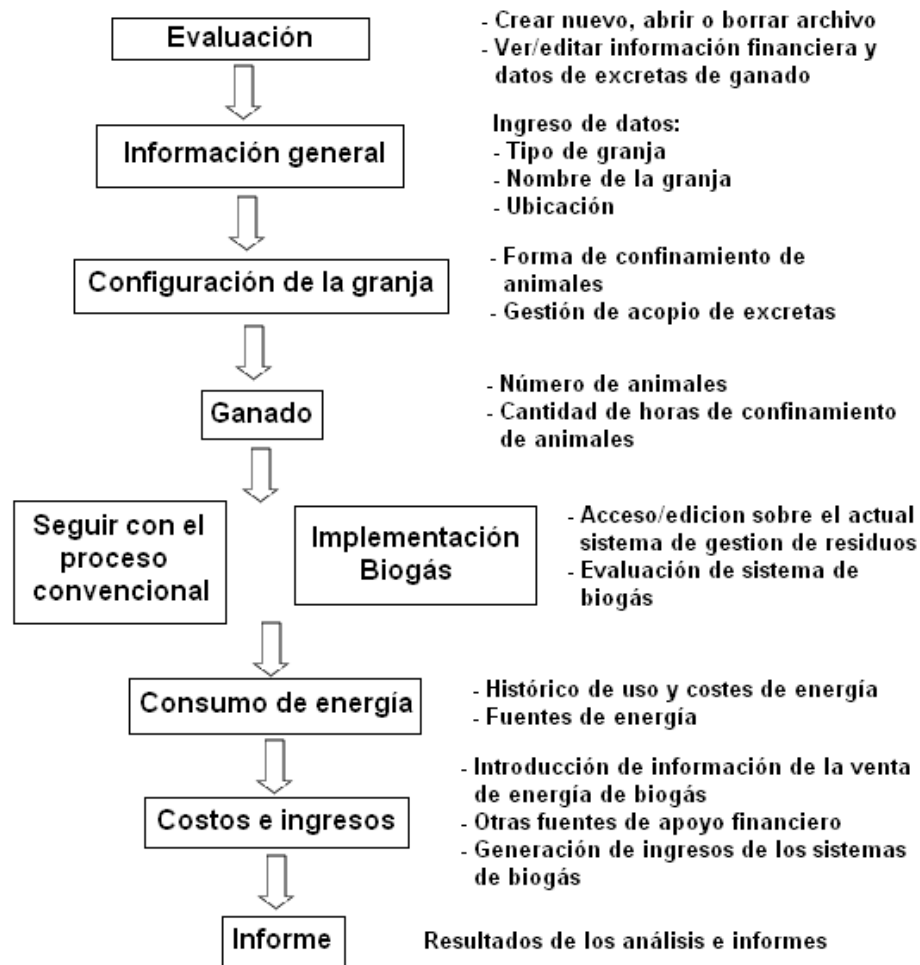
- Tasa diaria de excretas vacunas
 - Cantidad de excretas
 - Sólidos totales
 - Sólidos volátiles
 - Nitrógeno
 - Fósforo
 - Peso promedio de animales

- Uso del agua
 - Por área de confinamiento
 - Por tipo de animales

Otros datos que AgSTAR guarda en su base de datos, son aquellos relacionados con las temperaturas en las ciudades (sólo de E.E.U.U) donde se localizan las granjas, puesto que es de suma importancia saber el clima que nos rodea para poder escoger el digestor pertinente.

A continuación la figura 28 nos muestra mediante un gráfico de bloques cómo trabaja el programa.

Figura 28. Funciones de las ventanas/pantallas de AgSTAR



Todos los supuestos de la base de datos de AgSTAR, tanto de estimaciones mensuales de biogás, de metano y poder calorífico potencial de producción; son modificables, dado que cada granja es diferente, cada uno de ellos tendrá un sistema diferente y las hipótesis pueden cambiar. Pero en general, los datos de diseño son el volumen del digestor, tiempo de retención hidráulica y superficie transversal

Como conclusión del análisis de este sistema podemos decir que sirve para ayudar a la toma de decisión del productor de biogás de producir para vender, modificar o para implementar su granja y el sistema de digestión actual. Sin embargo la cantidad de especificaciones técnicas requeridas en algunas pantallas y la dificultad de acceso a dicha información hacen que

el programa se torne difícil de operar en beneficio de nuestros objetivos, que es trabajar en un digestor rural para una comunidad campesina.

6.1.2.Biogás!

Programa elaborado en Suiza, es el resultado de la investigación de un grupo de ingenieros interesados en estimular el uso de energías limpias, específicamente la utilización del biogás como combustible.

Similar al programa de AgSTAR, ayuda al productor o ganadero a la toma de decisiones para implementar su sistema actual de acumulación de restos o excretas. Es decir, ayuda en la dimensión de la planta de biogás (dando como resultados volumen total de biogás producido, tiempo de retención, etc.) y determinar sus costes energéticos y beneficios financieros.

El programa de aplicación tiene integrado una amplia base de datos que nos puede proporcionar la mayoría de las situaciones, como combinaciones de diferentes sustratos con variaciones de las aportaciones durante diferentes meses, además se tienen en cuenta los factores climatológicos, balance energéticos, diferentes tecnologías de digestores (UASB, Plug flow, etc.), cálculos económicos con diferentes tasa de interés, periodo de pago, etc.

Como en el caso anterior es de suma importancia el conocer muchos detalles de nuestro sistema actual, como cantidades diarias de purines que se tiene, contenidos en sólidos totales, volátiles, etc. La figura 29 nos muestra una visión de cómo trabaja este programa.

Figura 29. Visión general del programa Biogas!

Visión general del programa



Ventajas

- Ayuda a la toma de decisiones de implementar o no, el sistema actual
- Ayuda al conocimiento del sistema modificado, beneficio, costes, etc.

Desventajas

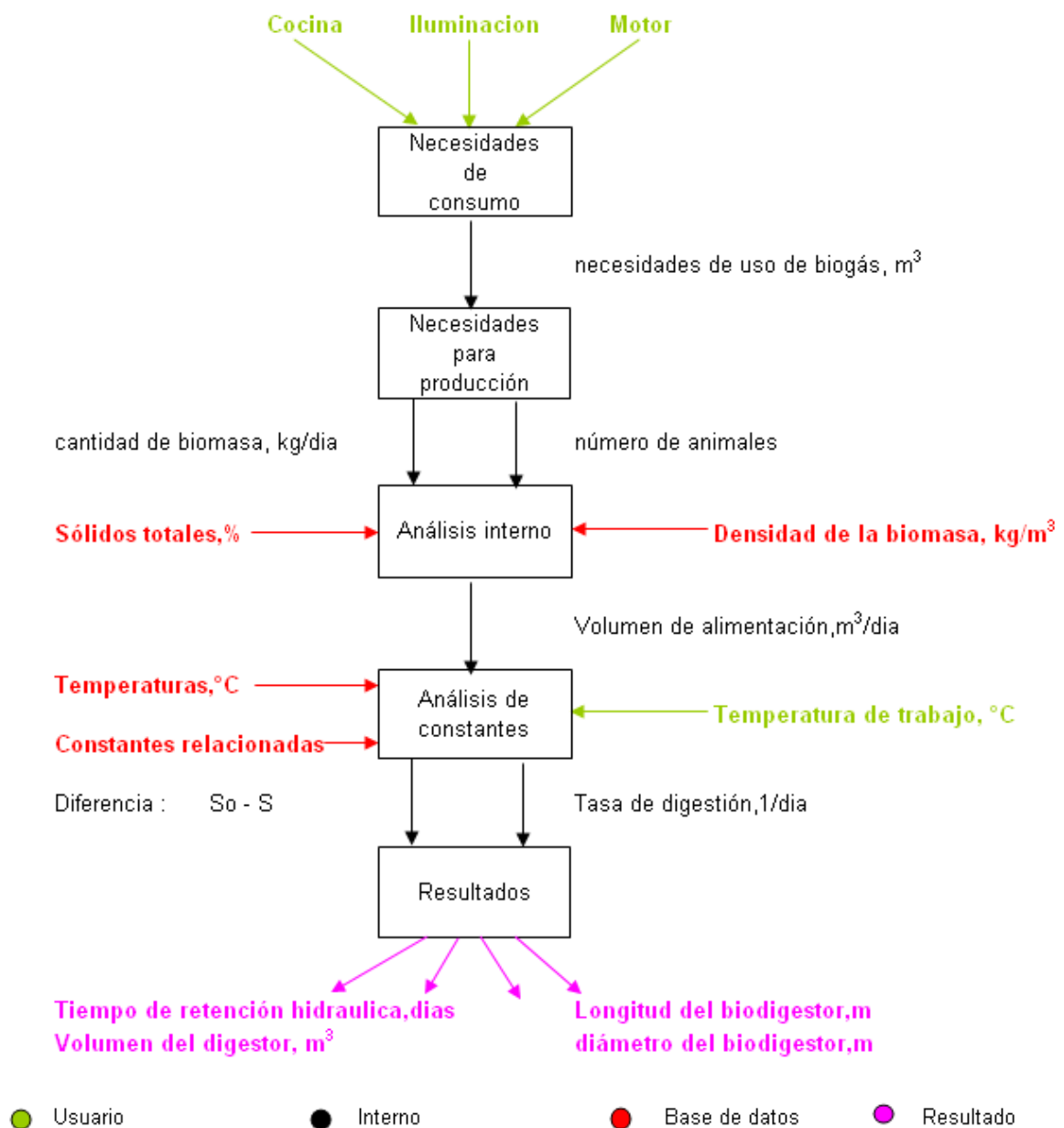
- Se requiere que el productor conozca específicamente las características de la materia prima como cantidad de sólidos totales, volátiles, biodegradabilidad, etc.
- Es imprescindible una mínima cantidad de animales para el análisis del sistema.
- Es imprescindible conocer el uso actual de la energía en los establos.
- Es necesario contar con personal cualificado para el análisis del sistema actual así como para el mantenimiento.

6.2. Aplicación propuesta

Para la determinación de las dimensiones del digestor he utilizado el modelo cinético de primer orden, y como herramienta de trabajo he utilizado Mathcad.

La programación de la aplicación esta dividida en 5 etapas, de las cuales las describo a groso modo con un diagrama de bloques en la figura 30:

Figura 30. Diagrama de bloques de la aplicación



Cabe resaltar que los datos que figuran con color rojo dentro del diseño, como puede ser los contenidos de sólidos totales de la biomasa, densidad, etc., puede ser modificado por el usuario.

Los resultados de este sencillo programa serán:

- El tiempo de retención hidráulica que viene a ser los mismo que el tiempo de fermentación que necesita la biomasa para poder producir biogás
- El volumen total del digestor que necesito para poder satisfacer mis necesidades.
- Longitud del digestor.
- Ancho o diámetro del digestor.

A continuación explico cómo funciona la aplicación en sus diversas etapas con un ejemplo demostrativo, que consiste en un requerimiento de 1m^3 además variaré algunos parámetros que afectan a la digestión anaerobia y analizaré los resultados de los gráficos.

1ra etapa: Necesidades de consumo

Iniciamos con el valor de la producción diaria de biogás

$$g_{\text{dia}} := 1 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$$

2da etapa: Necesidades físicas para la producción

De acuerdo a la tabla 14; 10kg/día de las vacas producen de 0.28 – 0.34 $\text{m}^3/\text{día}$ de biogás, en el peor de los escenarios, es decir, suponiendo que la producción es mínima, se requeriría:

$$\text{masa_excretas_vaca} := \frac{\left(10 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}} \cdot \text{gdia}\right)}{0.28 \frac{\text{m}^3}{\text{day}}}$$
$$\text{masa_excretas_vaca} = 35.714 \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

Hay que resaltar que la cantidad de $0.28 \text{ m}^3/\text{día}$ puede ser modificada por el usuario cuando crea conveniente. En este caso, se necesita aproximadamente 36 kg/día de excretas, pero conviene saber cuántas vacas se necesitan para poder obtener dicha cantidad de masa.

Y con la ayuda de la información que nos proporciona la tabla 3 podemos encontrar el número de vacas que necesita dicho requerimiento.

$$\text{output_vaca} := 12 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

$$\text{nro_vacas} := \frac{\text{masa_excretas_vaca}}{\text{output_vaca}}$$

$$\text{nro_vacas} = 3$$

3ra etapa: Análisis interno

Para empezar el procesamiento de los datos, es necesario que se cuente con determinada información. Para poder utilizar este método supongo la densidad de la biomasa:

$$\text{hip_densi} = 1 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Éste termino puede ser modificado por el usuario. Además, también es necesario que se sepa de antemano los valores de sólidos totales que

contiene la biomasa, proveniente en este caso del ganado vacuno. Dichos valores vienen en % en la Tabla 14.

$$\mathbf{sol_tot_2} := \begin{pmatrix} 0.16 \\ 0.165 \\ 0.17 \\ 0.175 \\ 0.18 \\ 0.185 \\ 0.19 \\ 0.195 \\ 0.2 \end{pmatrix}$$

Y para hallar el volumen de alimentación diaria:

$$vd_vaca := \frac{masa_excretas_vaca}{sol_tot_vaca \cdot hip_densi}$$

Fuente: Running a Biogas programme, David Fulford

El volumen de alimentación diaria resultante es:

$$vd_vaca = \begin{pmatrix} 0.223 \\ 0.216 \\ 0.21 \\ 0.204 \\ 0.198 \\ 0.193 \\ 0.188 \\ 0.183 \\ 0.179 \end{pmatrix} \frac{m^3}{day}$$

4ta etapa: Análisis de constantes

La primera hipótesis con que trabaja este proceso implica que la tasa de conversión de sustrato sea directamente proporcional a la concentración del sustrato.

t : días

St : concentración del sustrato, expresada en ST,SV, DQO o DBO, kg/m³

k : constante de primer orden, 1/día

$$\frac{dS}{dt} = -kS$$

Como hipótesis final, el volumen del gas despedido por el digestor es proporcional a la masa del sustrato destruida.

$$g_{\text{día}} = \text{const} \cdot v_d \cdot (S_0 - S)$$

Para hallar la constante “const” nos apoyamos de una tabla que viene definida como consecuencia de estudios anteriores en la biomasa del ganado vacuno en un digestor de producción continua, relacionándolo con la temperatura de la siguiente manera:

Tabla 22. Constantes de campo

Temperatura (°C)	Constante de campo, const		Ratio de la constante, k	
	Sólidos volátiles	DQO	Sólidos volátiles	DQO
33.5	402	347	0.083	0.081
30.1	450	347	0.052	
27.5	310	347	0.044	
25	289	237	0.069	0.078
24.4	250	237	0.036	
20.3	310	237	0.022	
16	178	164	0.033	0.026

Fuente: Running a biogas programme: A handbook. David Fulford

Notas: la constante de campo depende del contenido de sólidos volátiles o de la demanda química de oxígeno. Experimentos hechos en Nepal y en Chowdhury.

Puesto que vamos a relacionar la concentración de la biomasa con sus contenidos de DQO, dejamos la siguiente tabla en la programación.

tabla_const_cinetica =		0	1
	0	33.5	347
	1	30.1	347
	2	27.5	347
	3	25	237
	4	24.4	237
	5	20.3	237
	6	16	164

Introducir la temperatura de trabajo, en celsius:

temperatura_in := 33.5

Relacionando la constante con la temperatura.

$$\text{const} := 347 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

De acuerdo a $g_{dia} = \text{const} \cdot v_d \cdot (S_o - S)$, necesitamos además la diferencia de concentraciones, que lo denominaremos:

$$g_{dia} = \text{const} \cdot v_d \cdot (S_o - S)$$

$$S_o - S_t = \text{diferencia}$$

$$\text{diferencia_vaca} := \frac{g_{dia}}{\text{const} \cdot v_d_vaca}$$

$$\text{diferencia} = \begin{pmatrix} 0.013 \\ 0.013 \\ 0.014 \\ 0.014 \\ 0.015 \\ 0.015 \\ 0.015 \\ 0.016 \\ 0.016 \end{pmatrix} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Otro factor importante en esta etapa es hallar la tasa de digestión (k), factor importante para hallar el tiempo de residencia de la biomasa en el digestor, que viene dada de la siguiente manera:

$$\text{diferencia} = k \cdot St \cdot TR$$

$$TR = \frac{\text{diferencia}}{k \cdot St}$$

Para hallar k, según Running a biogas programme:

$$k := C1 \cdot \exp \left[- \left(\frac{C2}{\text{temperatura_in_k}} \right) \right]$$

La temperatura introducida tiene que estar en kelvin,

$$\text{temperatura_in_k} := \text{temperatura_in} + 273.15$$

$$\text{temperatura_in_k} = 306.65$$

Estas constantes vienen predeterminadas en el sistema:

$$C1 = 7.5 \times 10^9$$

$$C2 := 7780$$

Y la tasa de digestión diaria es:

$$k = 0.072$$

$$ka := k \cdot \frac{1}{\text{day}}$$

$$ka = 0.072 \frac{1}{\text{day}}$$

5ta etapa: Resultados

Según este método, la concentración de substrato puede ser expresada en terminos de kg de sólidos volátiles (SV), sólidos totales (ST), demanda química de oxígeno (DQO), o demanda biológica de oxígeno (DBO). En este caso estamos utilizando los datos que tenemos en mano, que es la DQO.

$$So := 0.04 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Dato sacado de Anaerobic Digestion Model Nro. 1 para rangos de temperatura 25-37°C en un proceso dinámico.

Siguiendo con el procedimiento:

$$St := So - \text{diferencia}$$

$$St = \begin{pmatrix} 0.027 \\ 0.027 \\ 0.026 \\ 0.026 \\ 0.025 \\ 0.025 \\ 0.025 \\ 0.024 \\ 0.024 \end{pmatrix} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Se sabe que $\text{diferencia} = k \cdot St \cdot TR$ entonces,

$$TR = \text{diferencia} / (k \cdot St)$$

La programación,:

$$TR_vaca_i := \begin{cases} \text{for } h \in 0..8 \\ TR_vaca_h \leftarrow \frac{\text{diferencia_vaca}_h}{ka \cdot St_vaca_h} \\ TR_vaca_i \end{cases}$$

TR_vaca _i =	
.631	day
.941	
.261	
.591	
.932	
.283	
.646	
.022	
.409	

Y el volumen del digestor sería:

$$vol = TR \cdot vd$$

$$vol_vaca_i := \begin{cases} \text{for } h \in 0..8 \\ vol_vaca_h \leftarrow TR_vaca_h \cdot vd_vaca_h \\ vol_vaca_i \end{cases}$$

vol_vaca_i =

1.48
1.5
1.53
1.55
1.57
1.6
1.63
1.65
1.68

m³

Concuerda con la afirmación de que cada metro cúbico de materia orgánica provoca alrededor de medio metro cúbico de biogas.

Variando algunos parámetros:

- Disminución de la temperatura de trabajo a 30.1°C

Supongamos que tomamos el valor de la constante para unas condiciones óptimas donde la temperatura es 30.1°C

temperatura_celsius_1 := 30.1 esta en celsius

const_1 := 347 · $\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$ para terminos de CQO

diferencia_vaca_1 = $\begin{pmatrix} 0.013 \\ 0.013 \\ 0.014 \\ 0.014 \\ 0.015 \\ 0.015 \\ 0.015 \\ 0.016 \\ 0.016 \end{pmatrix} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Y para esa temperatura, según el procedimiento anteriormente detallado, el valor de la tasa de digestión sería

$$ka_1 = 0.054 \frac{1}{\text{day}}$$

La concentración de DQO sería:

$$St_vaca_1 = \begin{pmatrix} 0.027 \\ 0.027 \\ 0.026 \\ 0.026 \\ 0.025 \\ 0.025 \\ 0.025 \\ 0.024 \\ 0.024 \end{pmatrix} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El tiempo de residencia hidráulico es:

$$TR_vaca_1 \quad i =$$

8.812
9.225
9.65
10.089
10.542
11.009
11.491
11.99
12.505

day

Y el volumen resultante sería:

$$vol_vaca_1 \quad i$$

1.967
1.997
2.027
2.059
2.092
2.125
2.16
2.196
2.233

m³

- Disminución de Temperatura a 25 °C

temperatura_celsius_2 := 25 esta en celsius

const_2 := $237 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$ para terminos de CQO

$$\text{diferencia_vaca_2} = \begin{pmatrix} 0.019 \\ 0.019 \\ 0.02 \\ 0.021 \\ 0.021 \\ 0.022 \\ 0.022 \\ 0.023 \\ 0.024 \end{pmatrix} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{ka_2} := \text{k_2} \cdot \frac{1}{\text{day}}$$

$$\text{diferencia_vaca_2} = \begin{pmatrix} 0.019 \\ 0.019 \\ 0.02 \\ 0.021 \\ 0.021 \\ 0.022 \\ 0.022 \\ 0.023 \\ 0.024 \end{pmatrix} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{TR_vaca_2}_i = \text{day}$$

12.465
13.225
14.03
14.884
15.792
16.759
17.792
18.896
20.08



$$\text{vol_vaca_2}_i =$$

2.782	m^3
2.863	
2.948	
3.038	
3.133	
3.235	
3.344	
3.461	
3.586	

- Aumento de contenido de DQO

$$\text{So_vaca_3} := 0.08 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{St_vaca_3} := \text{So_vaca_3} - \text{diferencia_vaca}$$

$$\text{St_vaca_3} = \begin{pmatrix} 0.067 \\ 0.067 \\ 0.066 \\ 0.066 \\ 0.065 \\ 0.065 \\ 0.065 \\ 0.064 \\ 0.064 \end{pmatrix} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{TR_vaca_3}_i =$$

2.677	day
2.778	
2.879	
2.982	
3.086	
3.192	
3.298	
3.406	
3.516	

vol_vaca_3 i

0.598	m ³
0.601	
0.605	
0.609	
0.612	
0.616	
0.62	
0.624	
0.628	

- Disminución del contenido de DQO

$$So_vaca_4 := 0.02 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$St_vaca_4 := So_vaca_4 - diferencia_vaca$$

$$St_vaca_4 = \begin{pmatrix} 7.089 \times 10^{-3} \\ 6.686 \times 10^{-3} \\ 6.282 \times 10^{-3} \\ 5.879 \times 10^{-3} \\ 5.476 \times 10^{-3} \\ 5.072 \times 10^{-3} \\ 4.669 \times 10^{-3} \\ 4.265 \times 10^{-3} \\ 3.862 \times 10^{-3} \end{pmatrix} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

TR_vaca_4 i =

25.336	day
27.705	
30.377	
33.417	
36.904	
40.947	
45.687	
51.325	
58.141	

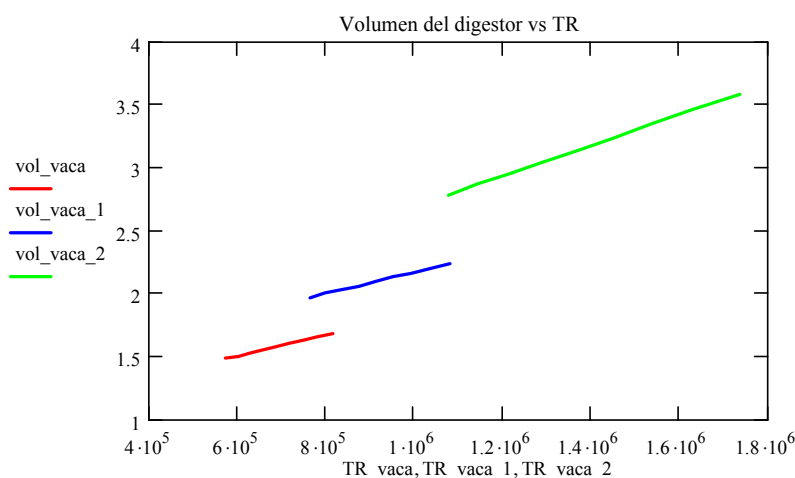
vol_vaca_4 $i =$

5.655	m^3
5.997	
6.382	
6.82	
7.322	
7.905	
8.588	
9.4	
10.382	

Resultados de los análisis

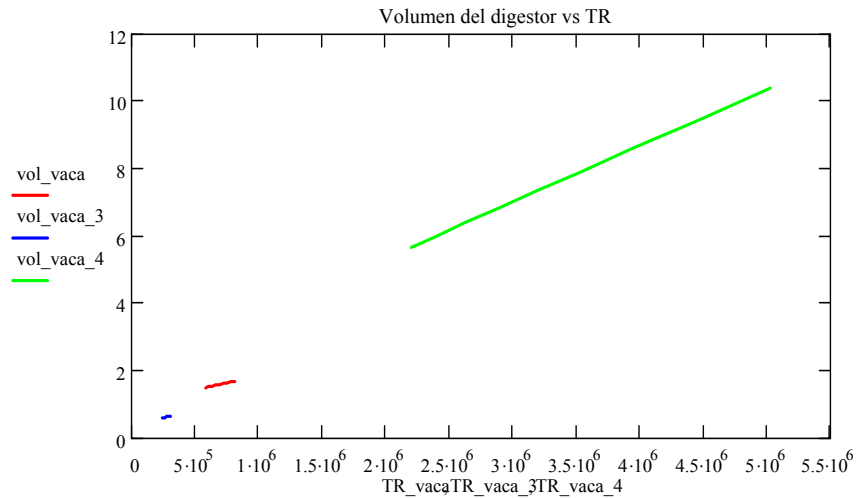
A continuación presento los resultados de las variaciones de los parámetros en la aplicación.

Resultado 1



Mientras los purines tengan más contenidos en sólidos totales, necesitará más tiempo para producir eficientemente biogás, que como primera impresión puede llevarnos a pensar que por ese motivo el volumen de la producción también aumentará. Pero hay que tener en cuenta que otro efecto es de generar sustancias tóxicas que empobrezcan los contenidos de metano en el biogás y por lo tanto no se pueda utilizar como combustible.

Resultado 2



Podemos comprobar aquí, que un aumento de la concentración de la biomasa, expresada como contenido de DQO, implica que el proceso se acelere, es por ello que el volumen a necesitar es mínimo, sin embargo hay que tener en cuenta que los altos contenidos de DQO ocasionan sustancias tóxicas en el biogás, degradando así o mejor dicho empobreciendo el gas. Lo mismo sucede al trabajar con biomasa con bajos contenidos de DQO, puesto que necesitaría más tiempo para la producción de biogás, pero como vimos en el caso anterior al variar las temperaturas, se empobrece también el contenido de metano en el biogás.

Comparación con la aplicación de otro método para hallar el volumen producido de biogás.

Es un método que proviene de la tecnología de digestores de tipo hindú.

Volumen de digestor de campana flotante, tipo hindú

cap: capacidad deseada en biogás por día

relac: relación de estiércol húmedo/estiércol seco (comunmente 5)

D: Peso de agua añadida a cada unidad de peso de estiércol

TF: tiempo de fermentación en días

Y: es el gas producido por unidad de peso de estiércol seco

d: densidad de la mezcla estiércol - agua

$$\text{relac} := 5$$

$$\text{cap} := 1 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$$

$$D := 1.5 \quad \text{de tabla 2}$$

$$t_f := 20 \text{ day} \quad \text{sacado de estimaciones}$$

$$Y := 0.075 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad \text{sacado de tablas, para } 30^\circ\text{C}$$

$$d := 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{utilizamos la misma hipótesis que el modelo anterior}$$

$$\text{vol_2m} := \left[\text{cap} \cdot \text{relac} \cdot (1 + D) \cdot \frac{t_f}{Y \cdot d} \right]$$

$$\text{vol_2m} = 3.333 \text{ m}^3$$

- Variando el tiempo de residencia

Como en el modelo anterior salían tiempos de residencia de 6 días, entonces lo haremos variar a partir de esas cantidades.

$$i_{2m} := 0..14$$

$$tf_2 := \begin{pmatrix} 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \\ 13 \\ 14 \\ 15 \\ 16 \\ 17 \\ 18 \\ 19 \\ 20 \end{pmatrix} \text{ day}$$

$$vol_{2m_2} := \left[cap \cdot relac \cdot (1 + D) \cdot \frac{tf_2}{Y \cdot d} \right]$$

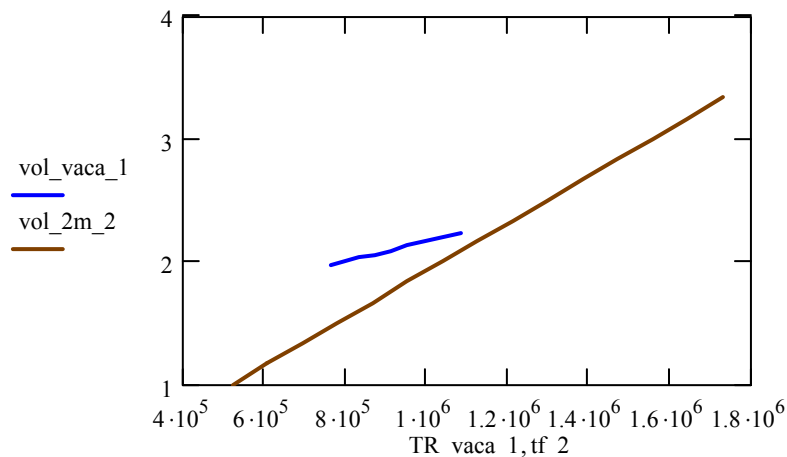
	0
0	1
1	1.167
2	1.333
3	1.5
4	1.667
5	1.833
6	2
7	2.167
8	2.333
9	2.5
10	2.667
11	2.833
12	3
13	3.167
14	3.333

$$vol_{2m_2} = \text{m}^3$$

$$vel_{carga} := \frac{cap}{Y \cdot vol_{2m}}$$

$$vel_{carga} = 4 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{day}}$$

Comparando los dos métodos presentados:



De acuerdo a la fórmula del segundo método es lógico que sea más lineal, ya que su dependencia es directamente proporcional al tiempo de residencia. Pero la desventaja de este método radica en la rigidez, hay que conocer plenamente los tiempos de residencia que necesitan los purines para que se pueda aplicar, conocimiento que sólo será obtenido a partir de la experiencia. Además no se encuentra relación alguna con la temperatura que es un parámetro importante que afecta al proceso de digestión anaerobia; puede deberse a que en los digestores de tipo hindú están ubicados por debajo del nivel de la tierra, es decir que esta cubierto completamente sus paredes, no hay mucha área del digestor en contacto con el medio ambiente, y la temperatura se puede mantener mucho mejor, pero para que sea óptimo es necesario que la materia prima entre con una adecuada temperatura.

Ahora utilizaremos la aplicación para unas necesidades más acordes a la vida cotidiana de los usuarios del digestor en una comunidad rural.

1ra etapa: Necesidades de consumo

El usuario podrá ingresar las necesidades en horas por día de requisitos básicos en un hogar con comodidades básicas, como puede ser la utilización de la cocina, luz en la tarde, y la posibilidad de utilizar el biogás como combustible para un pequeño motor de 2HP.

Ingresar las horas de cocina a utilizar:

$$t_{\text{uso_cocina}} := 5 \cdot \frac{\text{hr}}{\text{day}}$$

Ingresar las horas de luz a utilizar:

$$t_{\text{uso_luz}} := 4 \cdot \frac{\text{hr}}{\text{day}}$$

Ingresar las horas de motor a utilizar:

$$t_{\text{uso_motor}} := 4 \cdot \frac{\text{hr}}{\text{day}}$$

Dentro del programa se han grabado determinados datos que relacionan la equivalencia entre las necesidades en horas de luz, cocina, motor con el consumo valorados en m³ de biogás; todas provenientes de la tabla 7. El usuario podría cambiar estos datos también.

Como resultado, saldrá la cantidad en m³ que se requiere de biogás al día para poder satisfacer las necesidades del usuario.

$$g_{\text{dia}} = 4.17 \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$$

2da etapa: Necesidades físicas para la producción

Para poder producir la cantidad necesaria de biogás que requerimos, sería conveniente saber primero, si tenemos la capacidad de proveer la materia prima, es por ello, que el sistema nos da como un primer resultado la cantidad de excretas que necesita el sistema, así como el equivalente en número de vacas.

Se requerirá que se produzca:

$$g_{dia} = 4.17 \frac{m^3}{day}$$

Que equivale a esta cantidad de excretas por día:

$$masa_excretas = 148.93 \frac{kg}{day}$$

Para cubrir la producción necesitamos:

$$masa_excretas = 148.93 \frac{kg}{day}$$

$$nro_vacas = 12$$

Y tendremos que comparar esas cantidades con las que en realidad tenemos para la producción de biogás.

3ra etapa: Análisis interno

Será el mismo detallado en el ejemplo de

$$g_{dia} := 1 \cdot \frac{m^3}{day}$$

La densidad de la biomasa se supone:

$$hip_densi = 1 \times 10^3 \frac{kg}{m^3}$$

El intervalo de sólidos totales correspondientes sería:

$$\text{sol_tot_2} := \begin{pmatrix} 0.16 \\ 0.165 \\ 0.17 \\ 0.175 \\ 0.18 \\ 0.185 \\ 0.19 \\ 0.195 \\ 0.2 \end{pmatrix}$$

El volumen de alimentación que resulta es:

$$\text{vd} = \begin{pmatrix} 0.931 \\ 0.903 \\ 0.876 \\ 0.851 \\ 0.827 \\ 0.805 \\ 0.784 \\ 0.764 \\ 0.745 \end{pmatrix} \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$$

4ta etapa: Análisis de constantes

Necesitamos que el usuario introduzca la temperatura de trabajo que será la misma que tiene en el ambiente durante el día, en este caso suponemos 33.5 °C:

Introducir la temperatura de trabajo, en celsius:

$$\text{temperatura_in} := 33.5$$

Para ese valor según el procedimiento explicado anteriormente, las constantes correspondientes serían:

$$\text{C1} = 7.5 \times 10^9$$

$$\text{C2} := 7780$$

La tasa de digestión diaria es k_a :

$$k = 0.072$$

$$k_a := k \cdot \frac{1}{\text{day}}$$

$$k_a = 0.072 \frac{1}{\text{day}}$$

Y la diferencia correspondiente es:

$$\text{diferencia} := \frac{\text{gdia}}{\text{const} \cdot \text{vd}}$$

$$\text{diferencia} = \begin{pmatrix} 0.013 \\ 0.013 \\ 0.014 \\ 0.014 \\ 0.015 \\ 0.015 \\ 0.015 \\ 0.016 \\ 0.016 \end{pmatrix} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

5ta etapa: Resultados

Según este método, la concentración de substrato puede ser expresada en terminos de kg de sólidos volátiles (SV), sólidos totales (ST), demanda química de oxígeno (DQO), o demanda biológica de oxígeno (DBO). En este caso estamos utilizando los datos que tenemos en mano, que es la DQO.

$$S_o := 0.04 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Dato sacado de Anaerobic Digestion Model Nro. 1 para rangos de temperatura 25-37°C en un proceso dinámico.

Siguiendo con el procedimiento:

$$St := So - \text{diferencia}$$

$$St = \begin{pmatrix} 0.027 \\ 0.027 \\ 0.026 \\ 0.026 \\ 0.025 \\ 0.025 \\ 0.025 \\ 0.024 \\ 0.024 \end{pmatrix} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

La programación:

$$TR_i := \begin{array}{l} \text{for } h \in 0..8 \\ \quad TR_h \leftarrow \frac{\text{diferencia}_h}{ka \cdot St_h} \\ TR_i \end{array}$$

$$TR_i = \begin{array}{|c|} \hline 6.631 \\ \hline 6.941 \\ \hline 7.261 \\ \hline 7.591 \\ \hline 7.932 \\ \hline 8.283 \\ \hline 8.646 \\ \hline 9.022 \\ \hline 9.409 \\ \hline \end{array} \text{ day}$$

Y el volumen del digestor sería:

$$\text{vol} = \text{TR} \cdot \text{vd}$$

$$\text{vol}_i := \begin{cases} \text{for } h \in 0..8 \\ \text{vol}_h \leftarrow \text{TR}_h \cdot \text{vd}_h \\ \text{vol}_i \end{cases}$$

$$\text{vol}_i =$$

6.172
6.265
6.361
6.46
6.563
6.668
6.777
6.89
7.007

m³

Dependiendo de la cantidad en sólidos totales que tiene la biomasa, se recomienda un biodigestor de:

$$\text{vol}_i =$$

6.172
6.265
6.361
6.46
6.563
6.668
6.777
6.89
7.007

m³

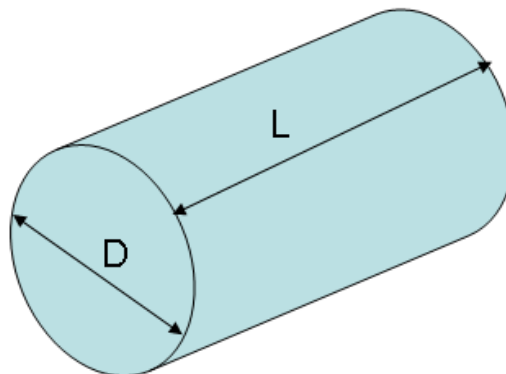
Y se recomienda que el tiempo de residencia sea:

$$\mathbf{TR} = \begin{pmatrix} 6.631 \\ 6.941 \\ 7.261 \\ 7.591 \\ 7.932 \\ 8.283 \\ 8.646 \\ 9.022 \\ 9.409 \end{pmatrix} \text{ day}$$

Ahora falta dar como resultado las dimensiones del digestor:

Sólo hay que tener en cuenta que nuestro digestor es un cilindro en posición horizontal.

Figura 31. Modelo de digestor



De acuerdo a “Manual para su instalación, operación y utilización” de Raúl Botero y Thomas R. Preston, es recomendable que la relación del diámetro y la longitud oscilen entre 1:5 y 1:10, siendo el más indicado 1:8

$$\text{relacion} = \frac{\text{diametro}}{\text{longitud}} = \frac{\text{Diam}}{\text{Long}}$$

El usuario se encargará de escoger la relación que más se adecue a sus posibilidades, la experiencia será el factor que determine que el usuario esta utilizando la mejor de las relaciones.

Inserte la relación a utilizar

relac := relac2

relac = 0.125

A su vez:

$$\text{vol} = \pi \cdot \frac{\text{Diam}^2}{4} \cdot \text{Long}$$

$$\text{Diam} = \text{relacion} \cdot \text{Long}$$

$$\text{vol} = \pi \cdot \frac{(\text{relacion} \cdot \text{Long})^2}{4} \cdot \text{Long}$$

$$\text{vol} = \pi \cdot \frac{\text{relacion}^2 \cdot \text{Long}^2}{4} \cdot \text{Long}$$

$$\text{Long} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot \text{vol}}{\pi \cdot \text{relacion}^2}}$$

En la aplicación:

$$\text{Long} := \left(\frac{4 \cdot \text{vol}}{\pi \cdot \text{relac}^2} \right)^{\left(\frac{1}{3} \right)}$$

$$\text{diam} := \text{relac} \cdot \text{Long}$$

las dimensiones de su biodigestor será:

$$\text{Long} = \begin{pmatrix} 7.952 \\ 7.992 \\ 8.033 \\ 8.075 \\ 8.117 \\ 8.16 \\ 8.204 \\ 8.25 \\ 8.296 \end{pmatrix} \text{ m} \quad \text{diam} = \begin{pmatrix} 0.994 \\ 0.999 \\ 1.004 \\ 1.009 \\ 1.015 \\ 1.02 \\ 1.026 \\ 1.031 \\ 1.037 \end{pmatrix} \text{ m}$$

Sin embargo hay que tener en cuenta las dimensiones adicionales del polietileno tubular, es decir, para cada extremo del digestor se necesita como mínimo 1m para que pase por el tubo de entrada (y de salida) además otro metro como medida de seguridad para el revestimiento; por lo tanto 2m para adicionales para cada extremo, en total 4 m además de la Long que da como resultado el sistema.

Se adjunta al proyecto los diferentes programas ahora explicados, además también está prog_blanco.mcd para que el usuario pueda utilizar la aplicación.

7. Conclusiones y recomendaciones

Para poder llevar a cabo un proyecto que consiste en la impartición del conocimiento de la tecnología para su futura implantación, hay que tomar en cuenta diferentes aspectos como lo son los campos socio-cultural, económicos, geográficos y climáticos en el que se implantará uno de los sistemas de la digestión anaerobia que han sido analizados en el transcurso del trabajo.

Las ventajas que ofrece la utilización de los digestores son apreciables en muy corto plazo, puesto que se disminuye notablemente la carga contaminante de los desechos animales, además que de ella se aprovecha la extracción de energía contenida intrínsecamente, así como se agrega valor a los fertilizantes resultantes.

El digestor que se mejor se adapta a las condiciones socio-económicas y culturales de las comunidades rurales son las de tipo bolsa, puesto que son fáciles de implantar y el coste es menor en comparación con los otros modelos, ya que no necesita una construcción de material noble para el digestor.

Los países han desarrollado diversos programas para poder aumentar la eficacia de este sistema (la digestión anaerobia). Hoy en día existen programas especializados que son utilizados por plantas de tratamientos de residuos urbanos o por ganaderos que cuentan con un gran número de animales; sin embargo estos programas requieren conocimientos más precisos de la materia prima, de las características climáticas del lugar, de diseño de planta y económicos; y tienen como principal objetivo servir como herramienta para la toma de decisiones de un productor que pretende beneficiarse económicamente de la producción del biogás como producto comercializable.

Mientras que las comunidades rurales tienen como objetivo el diseño de los digestores para que puedan adecuarlo a su modelo de vida, a sus viviendas, y gracias a ello poder depender menos de los combustibles fósiles. Es por ello que se debe proceder a simplificar estos programas para poder llevarlos al alcance de los campesinos, ya sea en el ámbito de la terminología como en el manejo del mismo.

La aplicación que propongo sigue la metodología del modelo cinético de primer orden, contienen parámetros que pueden ser modificados por el usuario cuando crea conveniente. Sólo es necesario conocer los valores de sólidos totales y DQO de la materia para su utilización. Análisis que puede ser proporcionado después de un estudio de laboratorio de las excretas de las vacas. Como resultado, el usuario tendrá conocimiento de las dimensiones del digestor que necesita instalar en su comunidad, y del tiempo de residencia que necesita los purines para que puedan producir biogás.

Una alta producción de biogás no es razón concluyente de un buen proceso de digestión, ya que de acuerdo a los parámetros que estamos variando podemos inducir a que crezcan sustancias tóxicas dentro de nuestro digestor y por lo tanto empobrecer su contenido de metano, y en consecuencia no se podría utilizar el biogás, ya que como se sabe, se requiere un contenido mínimo volumétrico del 50 % (de metano) para su uso efectivo.

Se hizo la comparación con otra metodología para hallar el volumen de biogás producido en un digestor tipo hindú, sin embargo los resultados demostraron que la segunda metodología no es apropiada, puesto que es más rígida y no muestra las relaciones directas con los parámetros que afectan el proceso de la digestión anaerobia; es por ello que la metodología que aplica el programa propuesto la adecuada.

Recomendaciones

La limitación de esta aplicación radica en la 4ta etapa, en el análisis de las constantes que están relacionadas con las temperaturas de trabajo. Para poder tener resultados más precisos es necesario que se haga una investigación de campo y posteriores análisis en laboratorio de las excretas de las vacas y así poder tener más flexibilidad a la hora de tomar o escoger las constantes respectivas.

El modelo que he utilizado estaba limitado al uso de excretas de ganado vacuno, sin embargo las comunidades cuentan con diversas especies de animales en sus comunas, así que posibles proyectos que estén interesados en continuar este proceso global, podría enfocarse a la investigación de purines provenientes de distintos animales.

Se adjunta un CD con los archivos correspondientes a: aplicación_1m3.mcd donde se explica detalladamente el método cinético de primer orden, digestor_dimensiones.mcd que incluye las necesidades del usuario y prog_blanco.mcd es la misma aplicación pero sin entradas de parte del usuario, es decir, es el modelo en blanco lista para su utilización.

8. Bibliografía

Artículos

1. Artículo: Anaerobic Digestion of Solid waste: State of the art
 Publicación: Water science and technology
 Autor: De Baere

2. Artículo: Biomass conversion technologies
 Autor: Ralph Overend

3. Artículo: Conversion processes in anaerobic digestión
 Publicación: Water science and technology
 Autor: W. Gujer and A.J.B Zehnder

4. Artículo: Energy production from biomass: overview of biomass
 Publicación: Bioresource technology
 Autor: Peter McKendry

5. Artículo: Energy production from biomass: conversion
 technologies
 Publicación: Bioresource technology
 Autor: Peter McKendry

6. Artículo: IWA Task group for mathematical modelling of
 anaerobic digestion processes
 Publicación: Anaerobic digestión model No.1
 Autor: D.J Batstone, J. Keller, I. Angelidaki, S.V Kalyuzhnyi,
 S.G pavlostathis, A. Rozzi, W.T.M Sanders, H.
 Siegrist, V.A Vavilin

7. Artículo: Modernization of biomass for poverty reduction
 Autor: Ralph Overend and Andrew Barnett

Libros

- | | | |
|----|--------|---|
| 1. | Libro: | La energía de la biomasa |
| | Autor: | Francisco Jarabo Friedrich |
| 2. | Libro: | Biofertilizantes, nutriendo cultivos sanos |
| | Autor: | tecnologías apropiadas, CEUTA |
| 3. | Libro: | Running abiogas programme: A handbook |
| | Autor: | David Fulford |
| 4. | Libro: | Guidebook on biogas development |
| | Autor: | energy resources development series, United nations |

Informes

- Informe: Anaerobic Digestion
Fuente: Soluciones Prácticas- ITDG
- Informe: Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas.
Autores: Raúl Botero y Thomas R. Preston
- Informe: Biodigestor de polietileno: Construcción & Diseño
Fuente: CEDECAP
- Informe: Biodigestores: Una alternativa a la autosuficiencia energética y de biofertilizantes.
Fuente: Fundación Hábitat
- Informe: Conceptos de la energía de la biomasa. Nro 15
Fuente: Soluciones Prácticas - ITDG



6. Informe: Los biodigestores en los sistemas agrícolas ecológicos
Fuente: LEISA Revista de Agroecología.
7. Informe: Producción de biogás, aspectos tecnológicos
Fuente: Soluciones Prácticas- ITDG

Sitios web

<http://www.fao.org/docrep/t0541e/T0541E00.htm#Contents>
<http://www.fao.org/sd/egdirect/egre0015.htm>
<http://www.fao.org/news/1997/971202-e.htm>
<http://www.noticiasypersonajes.com/ediciones/352/opinion1.html>
<http://ipsnoticias.net/nota.asp?idnews=41276>
<http://www.tuobra.unam.mx/publicadas/050711102241.html>
http://www.engormix.com/disenio_biodigestores_s_articulos_976_POR.htm
<http://www.desarrolloyregion.com/files/actividades/biogas%20oikos%20parte%20i%20-%20devadder.pdf>
<http://biodigestores.org>
<http://sleekfreak.ath.cx:81/3wdev/VITAHTML/SUBLEV/ES1/BIOGAS.HTM>
<http://es.geocities.com/tonyadry/biodigestor/index.htm>
<http://www.cipav.org.co/lrrd/lrrd19/12/mart19192.htm>
<http://proyectobiogas.blogspot.com/2008/03/produccion-de-biogas-digestores-quison.html>
www.wikipedia.org
www.ruralcostarica.com
www.proteger.com.ar

9. Anexos

9.1. Confección de la válvula de seguridad

Para hacer la válvula de seguridad rústica, se requiere de 3 tubos de PVC de una pulgada (medidas estándar que se consiguen en las ferreterías), dos cortos y uno largo, que se unirán a una botella de plástico de capacidad de 3L o 2,5L (normalmente las de refresco), foto 14.

Foto 14. Elementos a utilizar



Se recorta un cuadrado de 3*3 cm por la parte superior de la botella, debajo del cuello (foto 15), para que represente el limitante de agua en la misma (en la botella), luego se procede a llenar la botella con agua para formar el sello del gas.

Foto 15. Corte de la botella de plástico



A cada lado del cuello se harán agujeros que servirá para que pasen dos alambres que ayude a posicionar o a sujetar la válvula en la estructura de apoyo en la que se colgará la botella o válvula de seguridad.

El T se inserta en la botella de agua y se introduce en el agua que contiene la misma (la botella) a una profundidad de 4-5cm por encima del punto más bajo de la T, o lo que es lo mismo decir por debajo del nivel del agua. Para que el nivel de agua no varíe se perforan unos agujeros en el contorno de la botella a una altura de 5-6 cm por encima del punto mas bajo de la parte de la T introducida en la botella. Así aseguramos que si la presión del gas excede estos 5-6 cm, el gas pueda liberarse, y por consiguiente liberar presión, foto 16.

Foto 16. Haciendo agujeros



El tubo de plástico flexible es adjuntado a la salida del gas y unida a uno de los brazos del T, el otro brazo servirá para adjuntar a la tubería que lleve el gas a la cocina, foto 17.

Foto 17. Conexión de tuberías



La "trampa de agua" se encuentra suspendida en un lugar conveniente para que el nivel del agua puede ser fácilmente observada y su repuesta sea precisa, es decir cuando sea necesario, foto 18.

Foto 18. Instalando la válvula de seguridad



A continuación se procede a su sujeción en un lugar seguro donde pueda estar a la vista del usuario para que pueda verificar su correcto funcionamiento como se muestra en la foto 19.

Foto 19. Válvula de seguridad después de haber sido montada



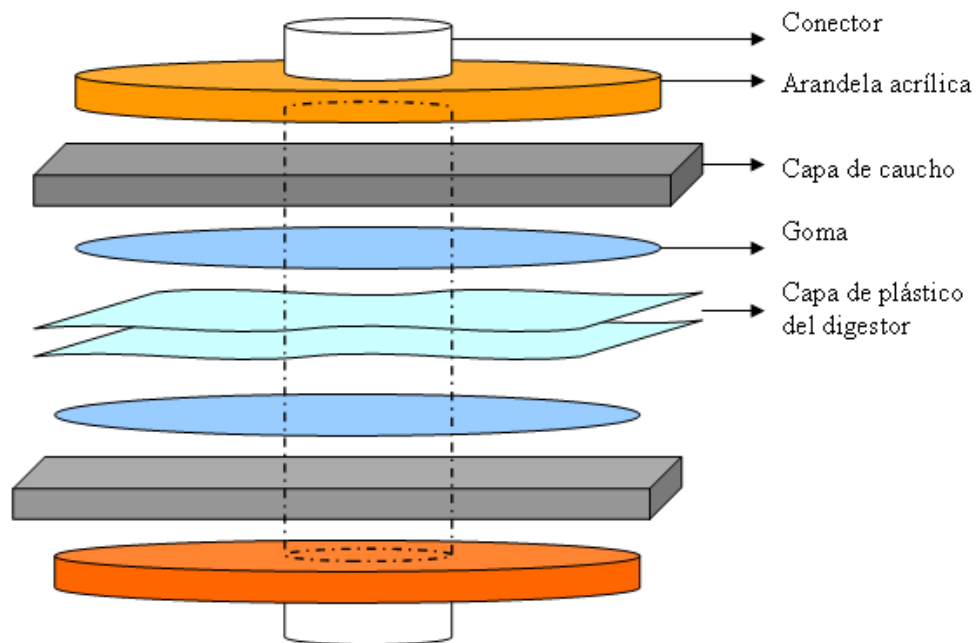
9.2. Manufactura del sello del tubo de transporte de biogás

Se recomienda ubicar la tubería de salida del biogás a 1,5m del extremo frontal pero en el centro de la parte superior del digestor. Por la ranura se introduce el extremo roscado de un conector macho de PVC de aproximadamente 2,5cm de diámetro, en el que previamente se coloca una arandela acrílica de 19cm de diámetro, se coloca de tal manera que antes de tener contacto con el plástico de las bolsas debe pasar por pedazos de caucho, que pueden ser recortes de una rueda de coche, foto 20. Se recomienda el orden de las partes mostradas en la figura 32.

Foto 20. Manufactura del sello



Figura 32. Las respectivas posiciones de los elementos que conforman el dispositivo de salida de gas.



Y así el tubo de transporte se instala en la bolsa, quedando como en la foto 21:

Foto 21. Instalando el sello en el digestor



Fuente: CEDECAP